

Mida CO₂ geoloogiline ladustamine tegelikult tähendab?

**Fossiilkütuste
vastutustundlik
kasutamine**

**Peamise
kasvuhoonegaaside
allika kõrvaldamine**

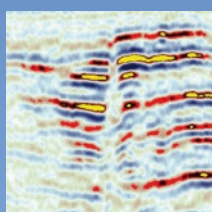
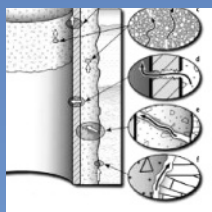
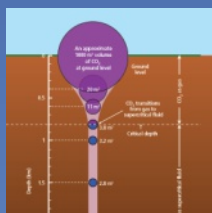
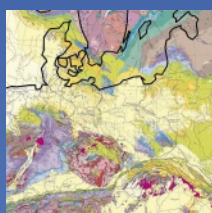
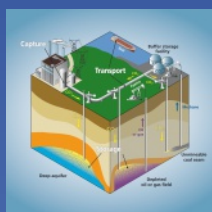
**Süsiniku tagasiviimine
maapõue**

**Ajavõit kliimasõbralike
energiaallikate arendamiseks**



CO₂ GeoNet Euroopa tippvõrgustik

Sisukord



Kliimamuutus ja vajadus CO₂ geoloogiliseks ladustamiseks	4
1. Kus ja kui palju me saame CO ₂ ladustada maapõue?	6
2. Kuidas me saame transportida ja sisestada suuri CO ₂ koguseid?	8
3. Mis juhtub CO ₂ -ga, kui see on ladustamis- reservuaaris?	10
4. Kas CO ₂ võib reservuaarist lekkida, ja kui jah, siis mis on tagajärjed?	12
5. Kuidas me saame seirata ladustamiskohta maa all ja pinnalt?	14
6. Milliseid ohutuskriteeriume on vaja kehtestada ja arvestada?	16
Seletav sõnastik	18
Mis on CO₂ GeoNet?	19

Käesoleva brošüüri väljaandmisesse panustasid:

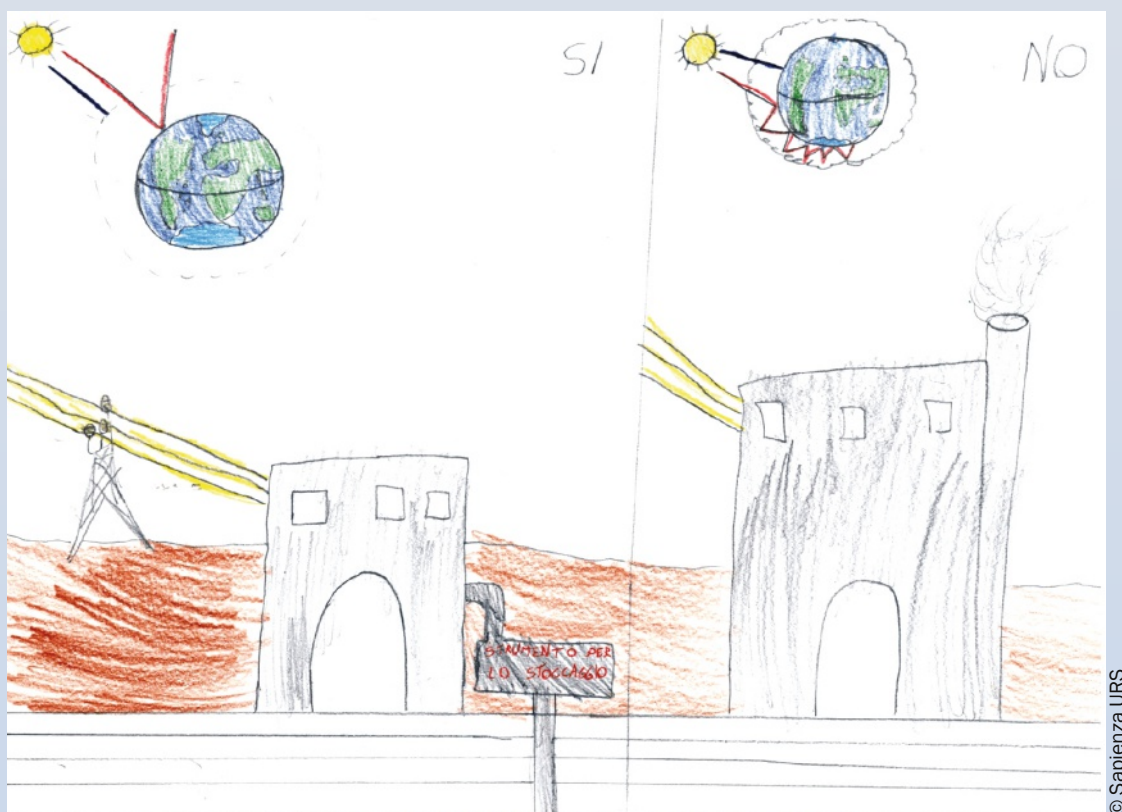
Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine, Ozgur Gundogan, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persoglia, Gijs Remmelts, Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kavvadias.

Eesti keelde tõlkisid Jüri Ivask ja Rein Vaher ning toimetas ja küljendas Jüri Ivask.

Tulevikuvisioon



**Ei enam suitsevaid korstnaid
Torujuhe toob CO₂ ja viib selle maasse
See on hea Maale**



Massimo, 10-aastane, Rooma, Itaalia

**Meie laste jaoks on
CO₂ geoloogiline ladustamine tähtis**

Kliimamuutus ja vajadus CO₂ geoloogiliseks ladustamiseks

Joonis 1
Maailma CO₂ heitmetest on seotud inimtegevusega summaarselt 30 miljardit tonni (Gt) aastas, mis vastab 8,1 Gt süsinikule: 6,5 Gt fossiilkütuste põletamisest ja 1,6 Gt metsade raadamisest ja põllumajandustegevuse tagajärjel.

Inimkond laseb liigse CO₂ atmosfääri

Nüüd on tunnustatud, et inimtegevus häirib looduslikku süsinikuringlust meie planeedil. Enne tööstusrevolutsiooni ja umbes 10 000 aastat tagasi andis see tasakaalustatud, looduslikku süsinikuringlust geosfääri, biosfääri, ookeanide ja atmosfääri vahel hõlmav tsükkel tulemuseks väikese CO₂ kontsentratsiooni atmosfääris (ligikaudu 280 ppm ehk 0,028%). Kuid viimase 250 aasta jooksul on meie fossiilkütuste (kivisüsi, nafta, gaas) põletamine

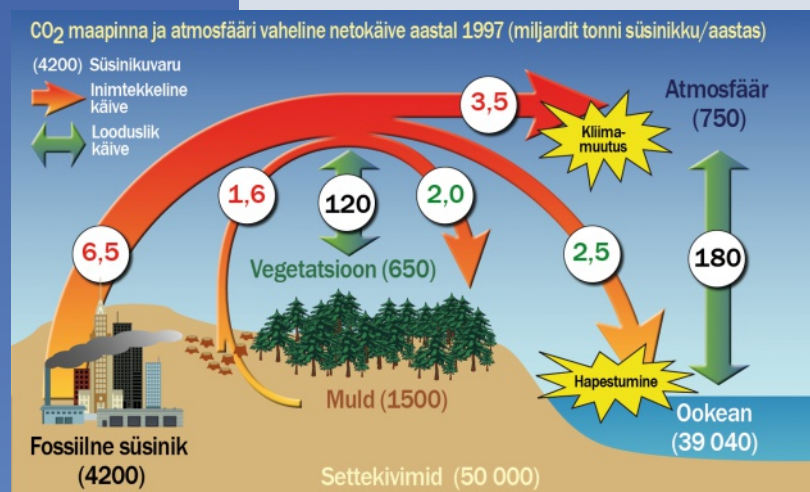
elektrienergia tootmise, kütte, tööstuse ja transpordi vallas lakkamatult suurendanud atmosfääri paisatavaid CO₂ koguseid (**joonis 1**). Umbes pool sellest inimtekkelisest ülekogusest on taasneeldunud taimkattes ja lahustunud ookeanides, kusjuures viimane põhjustab mererevee hapestumist ja sellega seotud võimalikke kahjulikke mõjusid meretaimedele ja -loomadele. Ülejäänud osa on kogunenud atmosfääri, kus see soodustab kliimamuutuste teket, sest CO₂ on kasvuhoonegaas, mis püüab lõksu osa Päikese soojusenergiast ning põhjustab maapinna soojenemist. Kohe on vaja rakendada radikaalseid meetmeid, et tänane atmosfääri CO₂ sisaldus 387 ppm (juba 38%-ne kasv võrreldes industriaalühiskonna eelse tasemega) ei tõuseks järgnevatel aastakümnetel üle kriitilise piiri 450 ppm. Maailma eksperdid on arvamisel, et CO₂ sisalduse tõustes nimetatud tasemest kõrgemale ei ole enam võimalik ära hoida kõige drastilisemaid tagajärgi.

Süsiniku tagasiviimine maasse

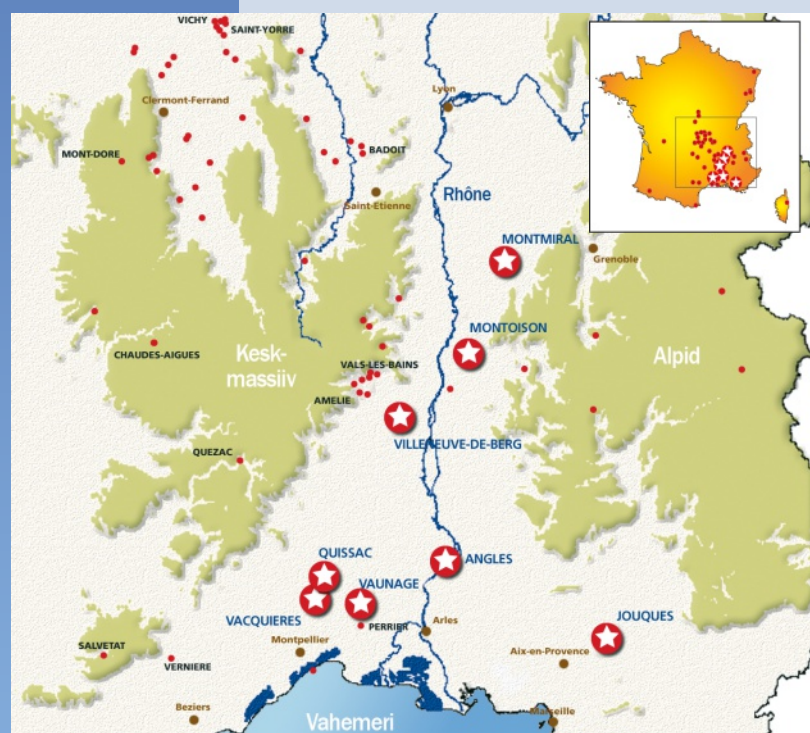
Meie maailm on suuresti sõltuv fossiilkütustest alates industriaalajastu algusest 1750. aastast, mistõttu pole üllatav, et meie ühiskonna ümberkujundamine kliimasõbralike energiaallikate põhiseks nõuab aega ja raha. Mida me vajame, on lühiajaline lahendus, mis aitaks vähendada meie sõltuvust fossiilkütustest, kasutades neid mittesaastaval viisil ning olles esimeseks sammuks, andmaks meile aega, et arendada tehnoloogiat ja taristut, mis viib meid taastuvenergia tulevikku. Üks võimalus on luua suletud energiatootmise süsteem, milles maast kaevandatud süsinik gaasi, nafta ja kivisöe kujul tagastatakse CO₂-na. Huvitav on märkida, et CO₂ maa-alune ladustamine ei ole inimese leiutis, vaid täiesti looduslik, laialt levinud nähtus, mis avaldub tuhandeid kuni miljoneid aastaid eksisteerinud CO₂ reservuaaridena*. Üks selline näide on seeria kaheksast looduslikust CO₂ reservuaarist Kagu-Prantsusmaal, mis avastati 1960. aastatel naftapuurimise käigus (**joonis 2**). Need ja paljud teised loodusobjektid kogu maailmas tõestavad, et geoloogilised formatsioonid on väga pikka aega võimelised CO₂ efektiivselt ja turvaliselt ladustama.

CO₂ kinnipüüdmine ja ladustamine: paljutootav tee kliimamuutuste leevendamiseks

Eri meetmete seas, mida tuleb kiiresti rakendada, leevendamaks kliimamuutusi ja ookeanide hapestumist, võib CO₂ kinnipüüdmisel ja ladustamisel (CCS* – CO₂ Capture and Storage) olla tähtis koht, sest see võiks anda 33% vajalikust CO₂ vähendamisest aastaks 2050. CCS



Joonis 2
Süsihappegaasi piirkond Prantsusmaal.



© BRGM im@gé

© BRGM im@gé

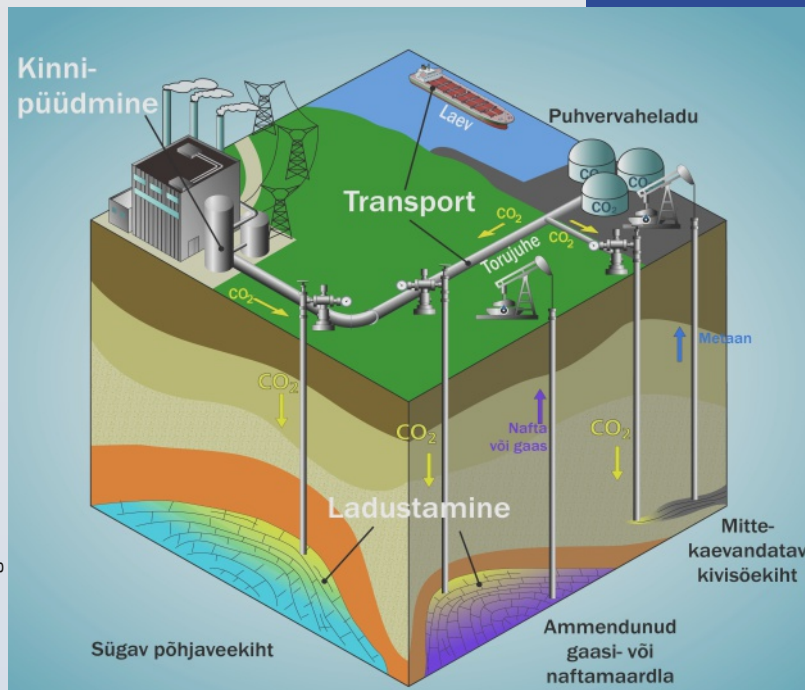
hõlmab CO₂ kinnipüüdmist söe- või gaasikütlet töötavate elektrijaamade ja tööstusrajatiste (terasetehased, tsemenditehased, rafineerimistehased jm) juures, transportimist torujuhtmete kaudu või laevadega ladustamiskohta ning selle sisestamist läbi puuraugu* sobivasse geoloogilisse formatsiooni pikaajaliseks ladustamiseks (**joonis 3**). Arvestades maailma kasvavat elanikkonda ja suurenevat energianõudlust arengumaades ning praegu puuduvaid alternatiivseid suuri „puhta“ energia allikaid, on jätkuv fossiilkütuste lühiajaliselt kasutamine paratamatu. Käsikäes CCS-iga saaks aga inimkond areneda keskkonnasõbralikult, ehitades samal ajal silda säästval energiatootmisel põhinevasse maailmamajandusse.

Ülemaailmne CCS-i arendustöö edeneb

Peamiselt on CCS-i uurimisprogramme läbi viidud Euroopas, Ameerika Ühendriikides, Kanadas, Austraalias ja Jaapanis alates 1990. aastatest. Palju teadmisi on juba omandatud maailma esimestes ulatuslikes esitusprojektides, kus CO₂ on mitu aastat sisestatud sügavale maa alla: Sleipner Norras (umbes 1Mt/aastas alates 1996) (**joonis 4**), Weyburn Kanadas (umbes 1,8 Mt/aastas alates 2000) ja In Salah Alžeerias (umbes 1Mt/aastas alates 2004). Rahvusvahelist koostööd CO₂ ladustamise uurimisel on edendanud IEAGHG* (International Energy Agency – Greenhouse Gas R&D programme – Rahvusvahelise Energiaagentuuri kasvuhoonegaaside vähendamise programm) ja CSLF* (Carbon Sequestration Leadership Forum – Süsiniku Eraldamise Juhtfoorum). Need ja muud teemad on olulised, avardamaks meie arusaamist probleemistikust ning loomaks globaalne teadlaskond, kes selle küsimusega tegeleks. Heaks näiteks on IPCC* (Intergovernmental Panel on Climate Change – Valitsustevaheline Kliimamuutuste Paneel) eriaruanne CO₂ kinnipüüdmise ja ladustamise kohta (2005), mis kirjeldab praegust teadmiste taset ja takistusi, mis tuleb ületada, et võimaldada selle tehnoloogia laialdast rakendamist. Tugevad tehnilised teadmised on olemas, ja maailm on nüüd suundumas demoetappi. Lisaks tehnoloogiale arengule tegeldakse õigus-, majandus- ja poliitilise raamistiku koostamisega ning hinnatakse sotsiaalset taju ja toetust. Euroopa sihiks on, et aastal 2015 töötaks vähemalt 12 suuremahulist näidisprojekti, võimaldamaks laialdast äriotstarbelist rakendamist aastal 2020. Selleks esitas Euroopa Komisjon jaanuaris 2008 "Kliimamuutuste ja taastuvenergia paketi", milles tehakse ettepanekud CO₂ geoloogilise ladustamise direktiivi rakendamise kohta ja esitatakse teisi meetmeid CCS-i arendamiseks ja ohutuks kasutamiseks.

Võtmeküsimused CO₂ geoloogilisel ladustamisel

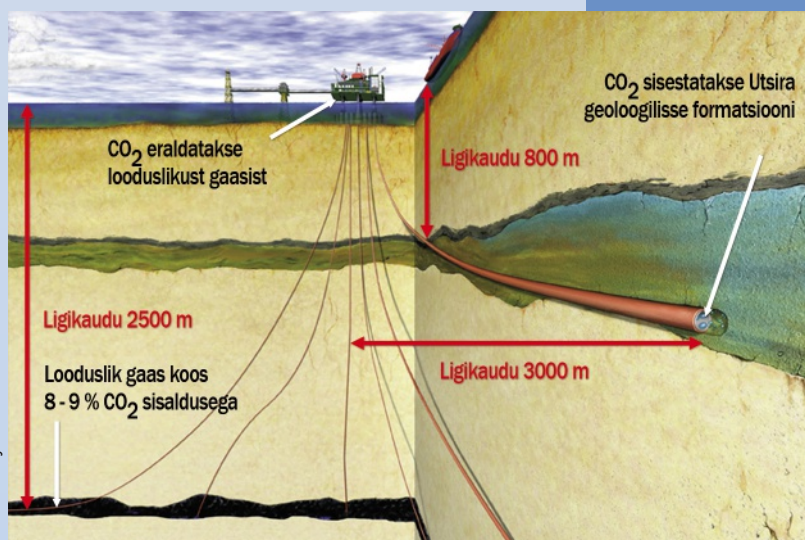
CO₂GeoNet tippvõrgustik loodi Euroopa Komisjoni egiidi all teadusasutuste rühmana, et Eu-



roopa oleks sellealaste suurte rahvusvaheliste teadusuuringute esirinnas. Üks CO₂GeoNet eesmärke on vahendada puhas teaduslikku teavet CO₂ geoloogilise ladustamise tehniliste aspektide kohta. Et ergutada dialoogi selle eluliselt tähtsa tehnoloogia oluliste aspektide üle, on CO₂GeoNet teadlased ette valmistanud vastused mitmetele korduma kippuvatele küsimustele. Järgnevatel lehekülgedel leiadki selgitused, kuidas on võimalik teostada CO₂ geoloogilist ladustamist, millistel tingimustel on see võimalik ja millised on kriteeriumid selle ohutuks ja tõhusaks rakendamiseks.

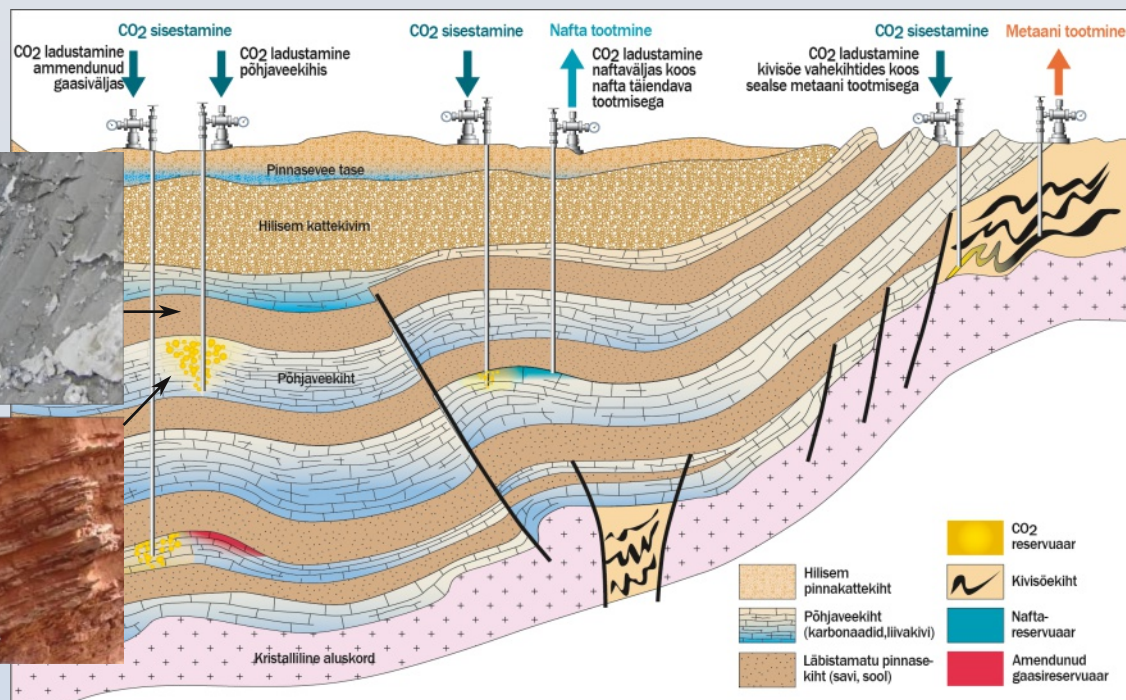
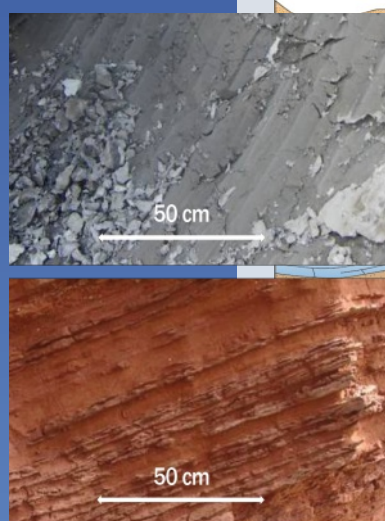
Joonis 4
Sleipneri polügooni (Norra) vertikaalne läbilõige. Maagaas, mida pumbatakse 2500 m sügavuselt, sisaldab mitu protsenti CO₂, mis tuleb eemaldada, vastamaks müügistandarditele. Selle asemel lasta seda atmosfääri, sisestatakse kinnipüütud CO₂ umbes 1000 m sügavusele liivasesse Utsira põhjaveekihti*.

Joonis 3
Elektrijaamades püütakse CO₂ kinni, eraldades selle teiste gaaside hulga, surutakse kokku ja transportitakse torujuhtme kaudu või laevaga geoloogilise ladustamise asukohta: sügavad soolased põhjaveekihtid, ammentatud nafta- ja gaasimaardlad, mittekaevandatavad kiviseekihtid.



Kus ja kui palju me saame CO₂ ladustada maapõue?

CO₂ ei tohi sisestada ükskõik kuhu maapõue. Enne peab tuvastama sobiva kivimkeha. Potentsiaalseid reservuaare CO₂ geoloogiliseks ladustamiseks leidub paljudes kohtades maailmas ja nende mahutavus on küllaldane, et anda oluline panus inimtekkeliste kliimamuutuste leevendamisse.



Joonis 1
CO₂ sisestatakse poorsete ja läbilaskvate kivimite (näiteks liivakivi alumisel läbilõikel) sügavatesse kihtidesse, mida katavad läbitungimatud kivimid (näiteks savikivi ülemisel läbilõikel), mis takistavad CO₂ jõudmist maapinnale. Peamised ladustamise võimalused on:
1. Ammendatud nafta-/gaasireservuaarides nende täiendav tootmine, kui on võimalik.
2. Põhjaveekiht, mis sisaldavad inimeste tarbimiseks kõlbmatut soolast vett.
3. Sügavad mitte-kaevandatavad söekihtid, kus kohati on võimalik metaani täiendav tootmine.

CO₂ ladustamiseks on kolm peamist võimalust (**joonis 1**):

1. Ammendatud loodusliku gaasi ja nafta väljad – hästi tuntud tänu süsivesinike uurimisele ja eksploateerimisele, pakuvad kohest võimalust CO₂ ladustamiseks.
2. Soolased põhjaveekihtid – neil on suur ladustamise potentsiaal, kuid nad ei ole tavaliselt nii hästi uuritud,
3. Mittekaevandatavad söekihtid – tulevikuvõimalus, kui on lahendatud probleem, kuidas sisestada suurel hulgal CO₂ vähesse läbilaskvusega* söekihti.

Reservuaarid

Kui CO₂ on juba sisestatud sobivasse kivimisse maapõues, siis ta akumuleerub teradevahelistes poorides ja lõhedes, välja tõrjudes ja asendades seal selliseid fluidumeid nagu gaas, vesi ja nafta. Seega peavad CO₂ ladustamiseks sobivad emakivimid olema suure poorsuse* ja läbilaskvusega. Sellised kivimid on geoloogilises minevikus setete kuhjumise tagajärg ja need esinevad tavaliselt nn settebasseinides. Kohati vahelduvad need läbilaskvad kivimid mitteläbilaskvatega. Viimased võivad olla läbitungimatud tihendid. Settebasseinides on sage-

li süsivesinike reservuaare ja loodusliku gaasi väljasid. Need on tõestanud oma võimet väga pika aja jooksul kinni hoida fluidumeid, säilitades miljoneid aastaid looduslikult püünistes naftat, gaasi ja isegi puhast CO₂.

Illustratsioonidel, mis näitavad CO₂ ladustamise võimalusi, on maapõue tavaliselt kujutatud ülelihtsustatult homogeense, kihilise struktuuri. Tegelikult koosneb see hoopis ebaühtlaselt levinud ja kohati lõhestunud kivimkehadest, kus reservuaarid ja katendud* moodustavad kokku keerulisi heterogeenseid struktuure. Sügavutiminevad teadmised ladustamiskohast ja geoteaduslikud kogemused on vajalikud pikaajaliseks CO₂ ladustamiseks pakutavate maaaluste struktuuride sobivuse hindamiseks. Potentsiaalsed CO₂ ladustamise reservuaarid peavad vastama paljudele kriteeriumidele. Neist on hädavajalikud:

- küllaldane poorsus, läbilaskvus ja mahutavus;
- lasuvad läbitungimatud kivimid – nn katend (s.o savi, savikivi, mergel, sool), mis takistavad CO₂ ülespoole liikumist;
- „püünisstruktuurid“ – sellised nagu kuplikujuline katend, mis suudab kontrollida CO₂ liikumist ladustamiskoha kivimites;
- asukoht sügavamal kui 800 m, kus rõhk ja temperatuur on küllalt suured, võimaldamaks

CO₂ ladustamist kokkusurutud fluidumi faasis, ja nii maksimeerida ladustatud kogust;
 • joogivee puudumine; CO₂ ei tohi sisestada vette, mis kõlbab inimestele tarbimiseks.

Kus leidub ladustamiskohti Euroopas?

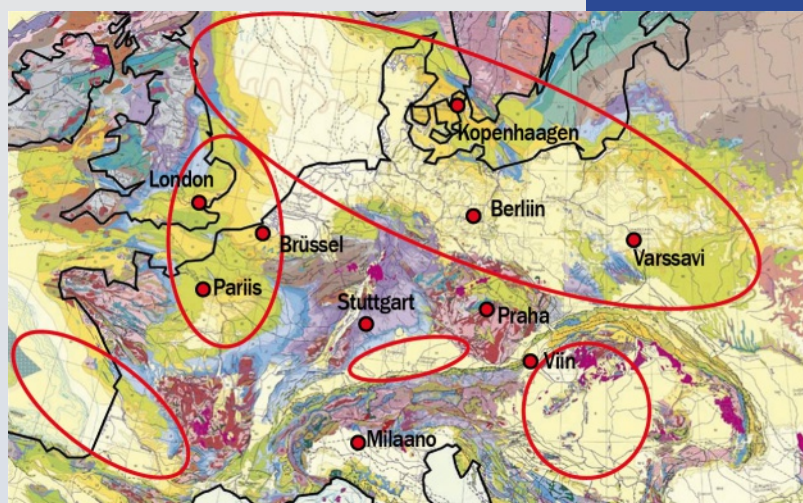
Settebasseinid on Euroopas, näiteks Põhjameres või Alpi mäeahelike ümbruses, laialt levinud (**joonis 2**). Paljud formatsioonid Euroopa basseinides vastavad geoloogilise ladustamise kriteeriumidele ning uurijad parajasti kaardistavad ja iseloomustavad neid. Teised Euroopa piirkonnad koosnevad ammu konsolideerunud maakoorest, näiteks Skandinaavias, mistõttu neis ei ole CO₂ ladustamiseks sobivaid kivimeid.

Üheks näiteks ladustamispotentsiaaliga alast on Permi Lõuna Bassein, mis ulatub Inglismaalt Poolani (suurim ellips joonisel 2). Setteid mõjutasid kivimit moodustavad protsessid, mis täitsid osa poore soolase vee, nafta või loodusliku gaasiga. Poorsete liivakivide vahel paiknevad savikihid on tihenunud väikese läbilaskvusega kihtideks, mis tõkestavad fluidumi tõusu. Palju sobivaid liivakivikihte asub sügavusel 1–4 km, kus rõhk on küllalt suur CO₂ ladustamiseks tiheda faasina. Soolasisaldus kivimite vees suureneb selles sügavusvahemikus 100g/l kuni 400 g/l, seega palju soolasemaks kui merevees (35 g/l). Liikumised basseinis on tekitanud soola plastilisi deformatsioone, luues sadu kuplilaadseid struktuure, mis on loodusliku gaasi püünisteks. Neid struktuurpüüniseid uuritakse võimalike CO₂ ladustamispaikadena ja pilootprojektide jaoks.

Ladustamisvõime

Ladustamisvõimet on vaja teada poliitikutel, asja reguleerivatel ametkondadel ja ladustamisoperaatoritel. Ladustamispaiga mahutavuse hinnangud on tavaliselt väga ligikaudsed ja põhinevad sobivate formatsioonide ruumilise leviku ulatusel. Mahutavust saab hinnata erinevates skaalades, alates riiklikust (jämedaks hinnanguks) kuni basseini või reservuaari skaalani täpsemateks arvutusteks, mis võtavad arvesse reaalse geoloogilise struktuuri heterogeensust ja keerukust.

Mahuvuslik mahutavus: Ladustamispaikade riiklikud publitseeritud mahutavused põhinevad tavaliselt kivimite pooride mahu arvutustel. Antud kivimkeha mahutavust saab teoreetiliselt arvutada, korrutades selle pindala paksusega, keskmise poorsusega ja CO₂ keskmise tihedusega reservuaari sügavusest sõltuvates tingimustes. Kuna aga poorides on juba vett, siis vaid väikest osa neist saab kasutada ladustamiseks, üldjoontes eeldatavalt umbes 1–3%. Seda ladustamisvõime koefitsienti siis kasutataksegi mahuvusliku mahutavuse hindamisel.



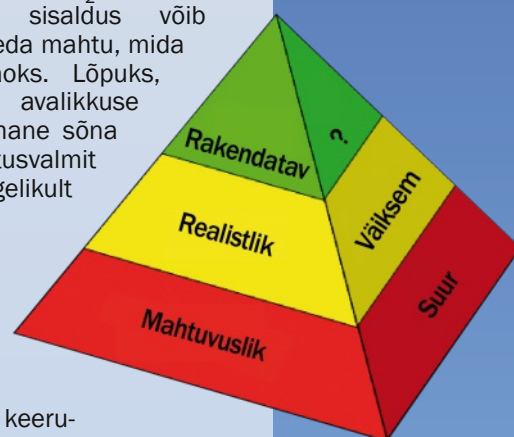
© BGR

Realistlik mahutavus: Realistlikumalt saab mahutavust hinnata konkreetsetes ladustamiskohas detailsete uuringute abil. Kivimite paksus ei ole konstantne ja reservuaari omadused võivad lühikeste vahemaade järel muutuda. Struktuuride suuruse, kuju ja geoloogiliste omaduste teadmine võimaldab meil vähendada ebamäärasusi mahu arvutamisel. Sellele infole tuginedes saab kasutada arvsimulatsioone CO₂ sisestamise ja reservuaaris liikumise ennustamiseks eesmärgiga hinnata realistlikku ladustamisvõimet.

Rakendatav mahutavus: Mahutavus ei ole ainult küsimus kivimite füüsikast. Ka sotsiaalökonomilistest faktoritest sõltub, kas sobivat ladustamiskohta saab kasutada või ei. Näiteks CO₂ toimetamisel allikast ladustamiskohani on määravad transpordikulud. Mahutavus võib sõltuda ka CO₂ puhtusest, kuna teiste gaaside sisaldus võib vähendada reservuaari seda mahtu, mida saab kasutada CO₂ jaoks. Lõpuks, poliitilistel valikutel ja avalikkuse vastuseisul võib olla viimane sõna otsustamisel, kas kasutusvalmit reservuaari saab ka tegelikult eksploateerida.

Kokkuvõetult me teame, et CO₂ ladustamisvõime on Euroopas suur, isegi kui on ebamäärasusi reservuaari keerukuse, heterogeensuse ja sotsiaalökonomiliste faktorite osas. Euroopa Liidu projekt GESTCO* hindas CO₂ ladustamisvõimeks süsivesinike väljades Põhjameres ja selle ümbruses 37 Gt, mis võimaldab mitme aastakümne vältel paigaldada selles piirkonnas CO₂ sisestamiseks suuri seadmestikke. Ladustamisvõime korrigeerimine ja edasine kaardistamine Euroopas on liikmesriikide ja Euroopa Liidu GEOCAPACITY* kaudu ka Euroopas laiemalt tulevaste uuringute teema.

Joonis 2
 Euroopa geoloogiline kaart, millel on näidatud peamiste settebasseinide asukohad (punased ellipsid), kus võib leida CO₂ geoloogiliseks ladustamiseks sobivaid reservuaare (põhineb Euroopa geoloogilisel kaardil määrdus 1 : 5 000 000).



Kuidas me saame transportida ja sisestada suuri CO₂ koguseid?

Pärast kinnipüüdmist tööstushoones surutakse CO₂ kokku, transporditakse ja seejärel sisestatakse läbi ühe või mitme puuraugu reservuaari. Kogu see ahel peab olema optimeeritud, et võimaldada ladustada aastas kuni mitu miljonit tonni CO₂.

Kokkusurumine

CO₂ surutakse kokku tihedaks vedelikuks, mis võtab oluliselt vähem ruumi kui gaas.

Kui CO₂ on eraldatud elektri- ja muu tööstusliku rajatise suitsugaasidest, siis saadud väga kontsentreeritud CO₂ vool surutakse kokku ja dehüdreeritakse, mistõttu transport ja ladustamine tõhustuvad (**joonis 1**). Dehüdratsioon on vajalik, et vältida seadmete ja infrastruktuuri korrosiooni ning kõrge rõhu all hüdraatide moodustumist (tahked jäätaolised kristallid, mis võivad ummistada seadmeid ja torustikke).

Kompressioon koos dehüdratsiooniga toimub mitmeetapilise protsessina: korduvad ja järgnevad kompressiooni, jahutamise ja vee eraldamise tsüklid. Rõhk, temperatuur ja vee sisaldus on kõik vaja kohandada transpordiliigiga ning ladustamiskoha rõhu nõuetega. Võtmetegurid kompressori paigaldusdisainile on gaasivoolu kiirus, imemis- ja väljavoolurõhk, gaasi soojusmahtuvus ja kokkusurutavus. Kokkusurumise tehnoloogia on kättesaadav ja paljudes tööstusvaldkondades juba laialt levinud.

Transport

CO₂ võib transportida kas laevaga või torujuhtme kaudu.

CO₂ vedu laevaga teostatakse praegu vaid tööstuslikuks kasutamiseks ja väga väikestes mastaapides (10 000–15 000 m³), kuid see võib kujuneda atraktiivseks tuleviku CCS

projektides, kus rannikulähedane CO₂ allikas on sobivast reservuaarist väga kaugel. Vedelgaasi vedamiseks kasutatavad tankerid sobivad ka CO₂ transportimiseks. Näiteks pooljahutatavad süsteemid on ühtlasi nii survestatud kui ka jahutatud ning seega saab CO₂ vedelas olekus vedada. Uusimate vedelgaasitankerite mahutavus on kuni 200 000 m³ ja need on võimelised vedama 230 000 tonni CO₂. Siiski, laevatransport ei võimalda katkematu voolu logistikat ja sadamates on vajalikud CO₂ vaheladustamise rajatised.

Torujuhtmetransporti kasutatakse suurte koguste CO₂, mida naftaettevõtted kasutavad nafta täiendavaks tootmiseks* (Enhanced Oil Recovery – EOR), transpordiks (umbes 3000 km CO₂ torujuhtmeid maailmas, enamik Ameerika Ühendriikides). See on tulusam kui laevatransport ja samuti on eeliseks katkematu vool kinnipüüdmiskohast ladustamiskohta. Olemasolevad CO₂ torujuhtmed töötavad kõrge rõhu all, kus CO₂ on superkriitilises olekus, mil ta käitub nagu gaas, kuid on vedeliku tihedusega. Niisiis kolm kõige olulisemat faktorit torujuhtme läbilaskevõime määramiseks on: juhtme läbimõõt, rõhk kogu selle ulatuses ja seinapaksus.

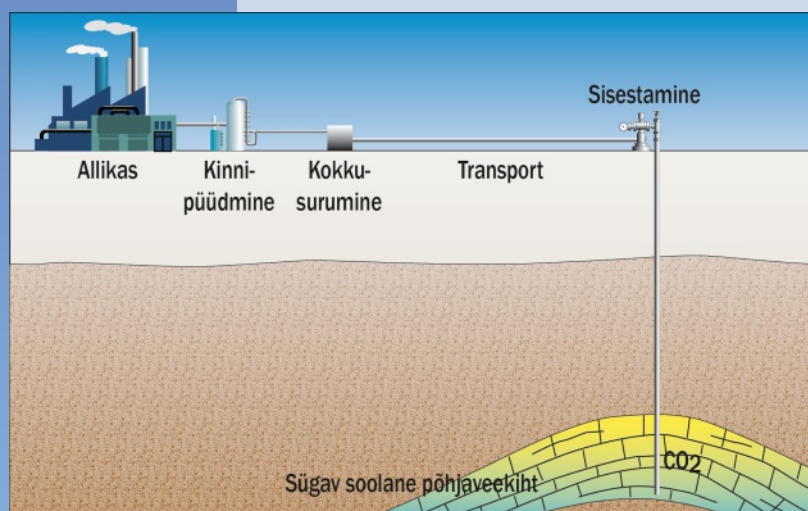
Sisestamine

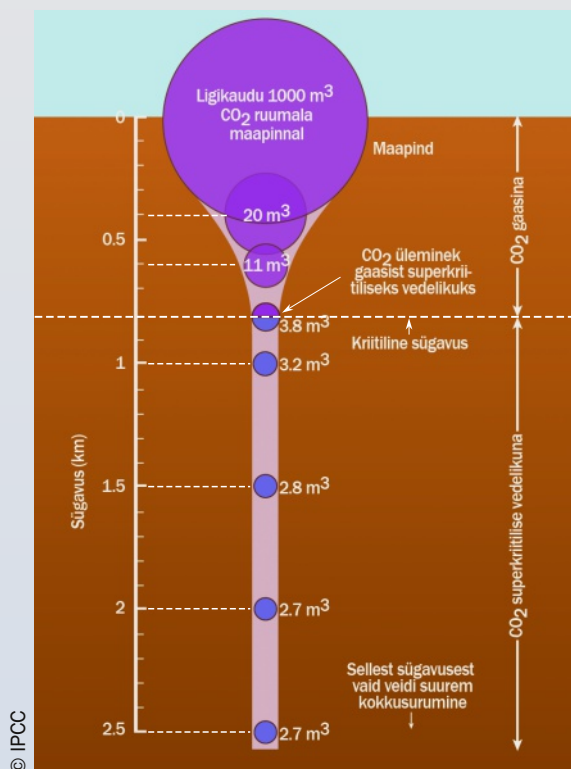
Kui CO₂ jõuab ladustamiskohta, sisestatakse see rõhu all reservuaari (**joonis 2**).

Sisestusrõhk peab olema reservuaarirõhust piisavalt suurem, et reservuaarivedelik hakkaks sisestuskohast eemale liikuma. Sisestuspuurkaevude hulk sõltub ladustatavast CO₂ kogusest, sisestamise kiirusest (tunni jooksul sisestatud CO₂ maht), reservuaari läbilaskvusest ja mõõtmetest, ohutust maksimaalsest sisestusrõhust ja puurkaevu tüübist. Et peamiseks eesmärgiks on CO₂ pikaajaline ladustamine, peame olema kindlad formatsiooni hüdraulilises terviklikkuses. Suur süsinikdioksiidi sisestuskiirus võib põhjustada rõhu tõusu sisestuskohas, eriti väikese läbilaskvusega formatsioonide puhul. Sisestusrõhk ei tohi tavaliselt ületada kivimi purunemisrõhku, kuna see võib kahjustada mahutit või seda katvat mitteläbilaskvat kivimit. Et leida süsinikdioksiidi sissejuhtimise maksimaalne rõhk, mille puhul on välditud pragunemine, kasutatakse geomehaanilisi analüüse ja mudeleid.

Ka keemilised protsessid võivad mõjutada CO₂

Joonis 1
CO₂ geoloogilise ladustamise etapid. Selleks et tuua CO₂ emissiooniallikast selle ohutu ja pikaajalise ladustamiseni, peab see minema läbi kogu operatsiooni ahela, sh kinnipüüdmise, kokkusurumise, transport ja sisestamine.





Joonis 2

Sisestamisel maasse muutub CO₂ umbes 0,8 km sügavusel tihedaks superkriitiliseks* vedelikuks. Selle maht on oluliselt vähenenud alates 1000 m³-st maapinnal kuni 2,7 m³-ni 2 km sügavusel. See on üks faktoreid, mis muudab suurtes kogustes CO₂ geoloogilise ladustamise nii atraktiivseks.

sisestamiskiirust. Sõltuvalt reservuaarikivimi tüübist, vedelike koostisest ja reservuaari tingimustest (näiteks temperatuur, rõhk, ruumala, kontsentratsioon jm), võib puuraugu läheduses toimuda mineraalide lahustumine või sadestumine. See võib aga omakorda suurendada või vähendada süsinikdioksiidi sisestamise kiirust. Niipea kui CO₂ on sisestatud, lahustub osa sellest soolases reservuaarivees ja selle pH* veidi väheneb, mis puhverdatakse kivimikihis leiduvate karbonaatsete mineraalide lahustumisega. Karbonaadid on mineraalid, mis lahustuvad esmajärjekorras, sest nende reaktsioonivõime on väga suur ja lahustumine algab kohe, kui CO₂ sisestamine algab. See lahustumisprotsess võib suurendada kivimi poorsust ja sisestatavust*. Ent pärast lahustumist võivad karbonaatsed mineraalid uuesti sadeneda ja puurkaevu ümbruse tsementeerida. Suure sisestuskiirusega saab piirata läbilaskmisvõime vähenemist puurkaevu lähedal, tõrjudes väljasadenemise geokeemilise tasakaalu tsooni kaugemale.

Veetustamine on teine CO₂ sisestamisest tingitud nähtus. Pärast hapestumise faasi lahustub puurkaevu lähedale jäänud ülejäänud vesi, sisestatud kuivas gaasis, mis omakorda kontsentreerib keemilisi ühendeid soolvees*. Mineraalid (nt soolad) võivad seejärel, kui

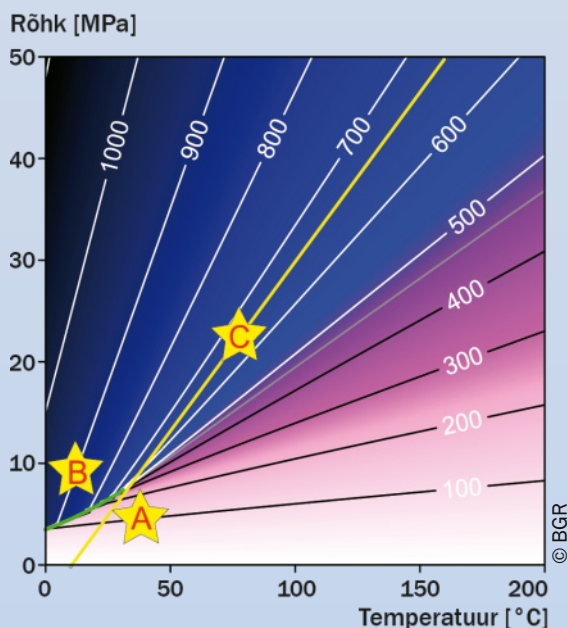
soolvesi on piisavalt kontsentreeritud, välja sadeneda, vähendades seega samuti hoidla-kivimite läbilaskvust.

Need sisestusprobleemid sõltuvad komplekssetest interaktsiooniprotsessidest, mis toimuvad lokaalselt sisestuspuurkaevu ümbruses, kuid mis on ka suuresti sõltuvad ajast ja sisestuskoha kaugusest. Nende mõjude hindamiseks kasutatakse numbrilisi simulatsioone. Sisestamise voolukiirusi tuleb käsitleda ettevaatlikult, et vältida protsesse, mis võivad piirata soovitud koguses CO₂ sisestamist.

CO₂ voolu koostis

CO₂ voolu koostisel ja puhtusel, mis tulenevad kinnipüüdmisprotsessist, on oluline mõju kõigile järgnevatele aspektidele CO₂ ladustamisprojektil. Mõne protsendi muude ainete, nagu vee, vesiniksulfiidi (H₂S), väävli ja lämmastikoksiidide (SO_x, NO_x), lämmastiku (N₂) ja hapniku (O₂) olemasolu mõjutab CO₂ füüsikalisi ja keemilisi omadusi ning sellega seotud käitumist ja mõju. Selliste ainete esinemine tuleb seetõttu hoolikalt arvesse võtta kokkuvõtte-, transpordi- ja sisestusfaaside projekteerimisel ja ka siis, kui kohandatakse seadmeid ja nende töörežiimi.

Kokkuvõtteks võib öelda, et CO₂ suures koguses transportimine ja sobivasse reservuaari sisestamine on juba praegu võimalik. Siiski, kui CO₂ geoloogilist ladustamist tuleb edaspidi laialdaselt kasutada, tuleb iga erinevat ladustamisprojekti kõigis etappides kohandada oludele. Võtmeparametrid on CO₂ voolu termodünaamilised omadused (**joonis 3**), voolukiirused ning reservuaari ja kattekihi omadused.



Joonis 3
Puhta CO₂ tihedus (kg/m³) funktsioonina temperatuurist ja rõhust. Kollane joon vastab tüüpilisele rõhu ja temperatuuri gradiendile settebasseinis. Sügavamal kui 800 m (~ 8 MPa), hõlbustavad reservuaari kasutamist kõrged tihedused (sinise varjundiga). Rohe-line kõver on piir CO₂ gaasilise ja vedela faasi vahel. Tüüpilised rõhu ja temperatuuri tingimused kogumisel, transpordil ja ladustamisel on tähistatud vastavalt kui A, B ja C.

Mis juhtub CO₂-ga, kui see on ladustamisreservuaaris?

Reservuaari sisestatud CO₂ tõuseb hõljuvalt, täites poorid katendi all. Aja jooksul osa CO₂-st lahustub ja muundub lõpuks mineraalideks. Need protsessid toimuvad erinevates ajaskaalades ja aitavad püsivale hõivele kaasa.

Hõivemehhanismid

Kui CO₂ sisestatakse reservuaari, täidab ta kivimi poorid, mis on enamasti eelnevalt juba soolase veega täidetud.

CO₂ sisestamise ajal tulevad mängu mitmed järgmised mehhanismid. Esimene neist on kõige tähtsam ja takistab juba sisestatud CO₂ kerkimist maapinnale. Ülejäänud kolmel hõivemehhanismil on soodne tendents aja jooksul ladustamise tõhusust ja kaitset suurendada.

1. Akumulatsioon katendi all (struktuuri-hõive)

Kuna tihe CO₂ on "kergem" kui vesi, hakkab see ülespoole tõusma. See liikumine peatub, kui CO₂ jõuab mitteläbilaskva kivimikihi (nn katend). See katend, mis tavaliselt koosneb savist või soolast, toimib püünisena, takistades CO₂ tõusmist kõrgemale ja sunnib teda akumuldeeruma allpool. **Joonis 1** illustreerib CO₂ ülespoole liikumist läbi poorsete kivimite (sinine), kuni see katendini jõuab.

2. Immobilisatsioon väikestes poorides (jäähõive)

Jääkimobilisatsioon esineb juhul, kui poorid reservuaarikivimites on nii kitsad, et CO₂ ei suuda enam liikuda ülespoole, vaatamata ümbritseva vee tiheduse erinevusele. See protsess esineb peamiselt CO₂ liikumise ajal ja suudab reservuaarikivimite omadustest sõltuvalt immobiliseerida vaid mõne protsendi sisestatud CO₂-st.

3. Lahustumine (lahustushõive)

Väike osa sisestatud CO₂-st lahustub soolases vees reservuaari poorides. Lahustunud CO₂-t sisaldav vesi on raskem ja tal on tendents liikuda allapoole reservuaari põhja suunas. Lahustumismäär sõltub CO₂ ja soolvee kontaktist. Lahustuda võiva CO₂ hulka limiteerib maksimumkontsentratsioon. Kuna sisestatud CO₂ liigub ülespoole ja vesi lahustunud CO₂-ga allapoole, siis soolvee ja CO₂ kontakt uueneb pidevalt ja suurendab lahustuda võiva CO₂ hulka. Need protsessid on suhteliselt aeglased, kuna nad toimuvad kitsastes poorides. Sleipneri projekti realiseerimise käigus tehtud hinnangud näitavad, et umbes 15% sisestatud CO₂-st on 10 aastat pärast sisestamist lahustunud.

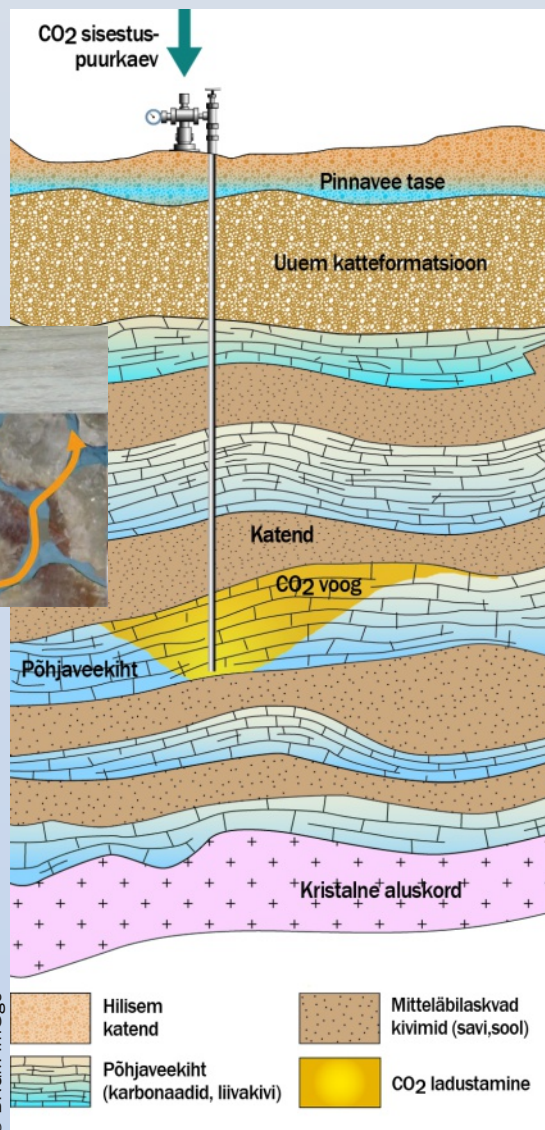
4. Mineralisatsioon (mineraalhõive)

CO₂, eriti koos soolveega reservuaaris, võib reageerida kivimit moodustavate mineraalidega. Teatavad mineraalid võivad lahustuda, teised aga sadestuda, sõltuvalt pH ja reservuaarikivimit moodustavate mineraalide koostisest (**joonis 2**). Hinnangud Sleipneri projektis näitavad, et vaid suhteliselt väike osa sisestatud CO₂-st muutub liikumisvõime tuks mineralisatsiooni kaudu ka väga pika aja jooksul. 10 000 aasta pärast on vaid 5% sisestatud CO₂-st mineraalse CO₂-na ja 95% lahustub, CO₂ eraldi tihefaasina sinna ei jää.

Mikroskoobivaade



Joonis 1
Sisestatud CO₂ olles veest kergem, kaldub tõusma ja peatub lasuvate läbilaskmatute kivimite all.





Joonis 2
Ülespoole liikuv tihe CO₂ (helesinised mullid) lahustub ja reageerib kivimi teradega, mille tulemusena karbonaatsed mineraalid sadestuvad tera pinnale (valge).

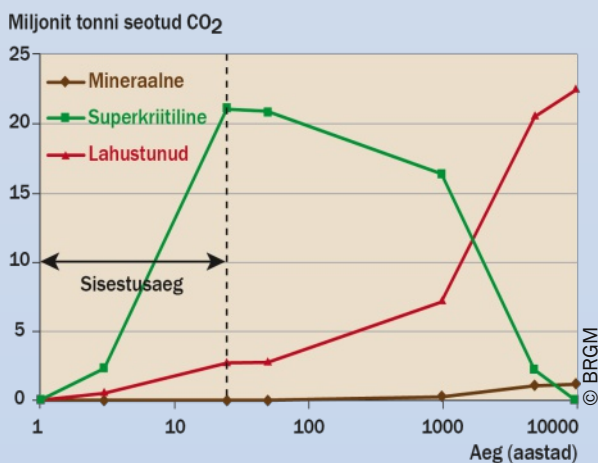
Nende hõivemehhanismide suhteline tähtsus on asukohaomane, s.t see sõltub iga ladestuspaiga omadustest. Näiteks kupli- laadsetes reservuaarides jääb CO₂ peamiselt tihefaasi ka väga pika aja pärast, lamedates reservuaarides (nagu Sleipner) aga enamik sisestatud CO₂-st kas lahustub või mineraliseerub.

CO₂ evolutsiooni erinevates hõivemehhanismides Sleipneri juhtumi puhul illustreerib **joonis 3**.

Kuidas me kõike seda teame?

Teadmised nendest protsessidest tulevad neljast peamisest teabeallikast:

- **Laboratoorsed mõõtmised:** kivimpaladega saab teha väikesemastaabilisi mineralisatsiooni, voolu ja lahustumise eksperimente, mis annavad selgust lühiajalistest ja vähe- ulatuslikest protsessidest.



Joonis 3
CO₂ erinevate vormide evolutsioon Sleipneri reservuaaris vastavalt voo simulatsioonidele. CO₂ on hõivatud superkriitilisel kujul mehhanismidega 1 ja 2, lahustunud kujul mehhanismiga 3 ja mineraalidena mehhanismiga 4.

- **Arvsimulatsioonid:** arvutiprogramme saab kasutada CO₂ käitumise ennustamiseks palju pikemate ajavahemike puhul (**joonis 4**). Arvsimulatsiooni kalibreerimiseks kasutatakse laboratoorsete eksperimentide tulemusi.

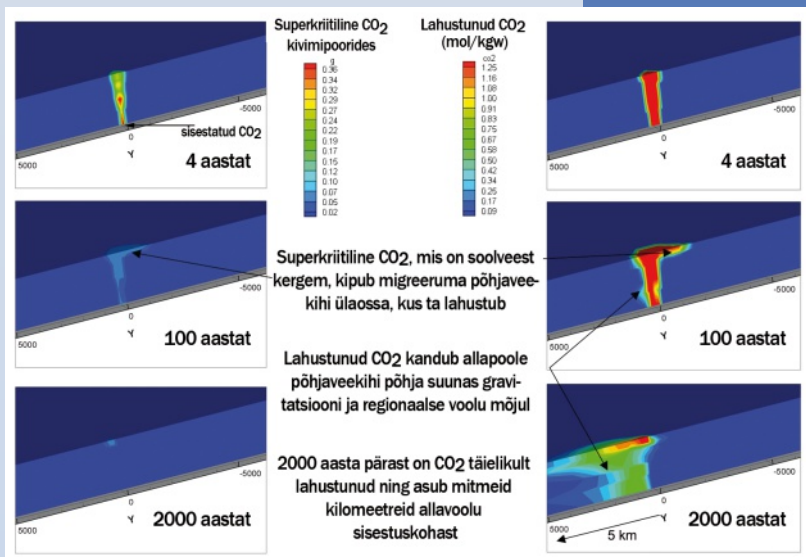
- **Looduslike CO₂ reservuaaride uurimine**, kus (peamiselt vulkaanilise päritoluga) CO₂ on olnud hõivatud väga kaua, sageli miljoneid aastaid. Nendele viidatakse kui "looduslikele analoogidele"*. Nad varustavad meid informatsiooniga gaasi käitumisest ja CO₂ maa all asumise väga pikaajalistest tagajärjedest.

- **Olemasolevate CO₂ geoloogilise ladustamise katseprojektide seire**, selliste nagu Sleipner (Norra merealal), Weyburn (Kanadas), In Salah (Alžeerias) ja K12-B (Hollandi merealal). Lühikese perioodiga simulatsioonide tulemusi saab võrrelda tegelike väliaandmetega, mis aitab mudeleid täiustada.

Vaid nende nelja infoallika pidev ristviitamine ja ristkontroll võimaldavad omandada usaldatavat teavet kõikide protsesside kohta 1000 m sügavusel maa all.

Kokkuvõttes me teame, et CO₂ ladustamispaikade ohutusel on tendents aja jooksul suureneeda. Kõige kriitilisem hetk on sobiva

Joonis 4
CO₂ migratsiooni ruumiline (3D) modelleerimine põhjaveekihi pärast 150 000 tonni sisestamist Doggeri põhjaveekihti Prantsusmaal. Joonisel on kujutatud superkriitiline CO₂ (vasakul) ja soolvees lahustunud CO₂ (paremal) 4, 100 ja 2000 aastat pärast sisestamise algust. Simulatsioon põhineb väliaandmetel ja eksperimentidel.



katendiga reservuaari leidmine, mis suudaks CO₂ kinni hoida (struktuurihõive). Kõik lahustumise, mineralisatsiooni ja jääkhõivega seotud protsessid aitavad täiendavalt vältida CO₂ liikumist maapinnale.

Kas CO₂ võib reservuaarist lekkida, ja kui jah, siis mis on tagajärjed?

Looduslike süsteemide uurimise alusel eeldatakse, et hoolikalt valitud ladustamiskohad oluliselt ei leki. Gaasi sisaldavad looduslikud reservuaarid aitavad meil mõista tingimusi, mille puhul gaas on seotud või vaba. Pealegi aitavad lekkivad ladustuskohad meil mõista, milline mõju võib CO₂ lekel olla.

Lekke teed

Potentsiaalsed lekke teed on kas inimtekkelised (näiteks sügavad puuraugud) või looduslikud (lõhesüsteemid ja murrangud).

Nii aktiivsed kui ka mahajäetud puuraugud võivad osutada CO₂ liikumisteedeks, sest esiteks on need otseühenduseks maapinna ja reservuaari vahel ja teiseks koosnevad need inimeste valmistatud materjalidest, mis võivad pika aja jooksul korrodeeruda (**joonis 1**). Lisakomplikatsioon tuleneb asjaolust, et kõik puuraugud ei ole rajatud ühesugust tehnoloogiat kasutades ja uuemad puuraugud on turvalisemad kui vanemad. Igatahes eeldatakse, et lekke risk puuraukude kaudu on väike, sest nii uusi kui ka vanu puurauke saab seirata väga efektiivselt, kasutades tundlikke geokeemilisi ja geofüüsikalisi meetodeid ning naftatööstuses on juba olemas tehnoloogia igasuguse korrastava tegevuse jaoks.

Äravool katendis või katendi lasumis* esineda võivate looduslike murrangute ja lõhede kaudu on komplekssem, kuna siin on tegu muutliku läbilaskvusega ja korrapärase tasapinnaliste vormidega. Nii lekkivate kui ka mittelekkivate looduslike süsteemide hea teaduslik ja tehniline mõistmine võimaldab meil kavandada CO₂ ladustamise projekte, millel on samad omadused kui looduslikel reservuaaridel, mis

on tuhandeid ja miljoneid aastaid CO₂ ja metaani kinni hoidnud.

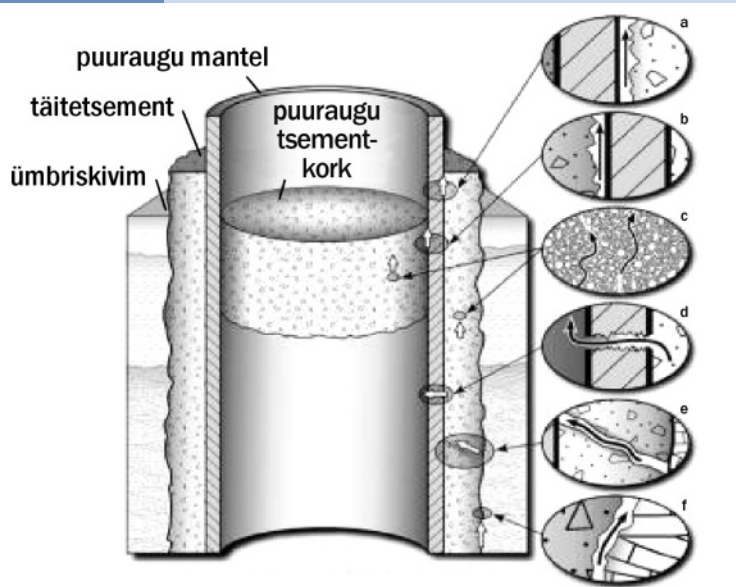
Looduslikud analoogid: õppetunnid

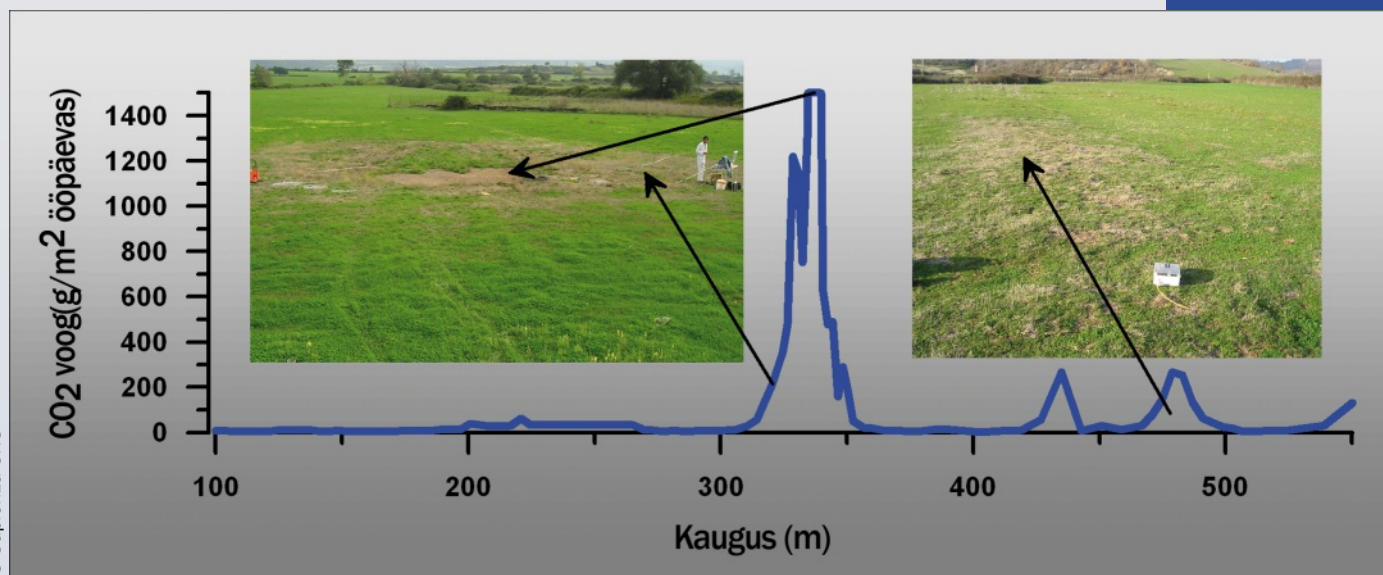
Looduslikud süsteemid (nn analoogid) on väärtuslikud infoallikad meie arusaamise täiendamiseks süvagaaside migratsioonist ja gaaside looduslikust vahetusest maa ja atmosfääri vahel. Arvukate lekkivate ja mitte-lekkivate loodusliku gaasi reservuaaride uurimisel saadud peamised tulemused on järgmised:

- soodsates geoloogilistes tingimustes võib looduslik gaas olla vangis tuhandeid ja miljoneid aastaid;
- isoleeritud gaasireservuaarid ja -taskud võivad esineda isegi vähem soodsates geoloogilistes tingimustes (vulkaanilised alad);
- gaasi liikumiseks olulisel määral on vajalik advektsioon (survest tingitud vool), sest difusioon on väga aeglane protsess;
- advektsiooni toimumiseks peavad fluidumi tingimused reservuaaris olema lähedased litostaatilisele survele*, et hoida murrangud ja lõhed avatuna või luua mehaaniliselt uusi teid;
- alad, kus looduslik gaas lekib maapinnale, asuvad peaaegu eranditult tugevasti lõhestunud vulkaanilistes ja seismilistes piirkondades, kus gaasiavad paiknevad piki aktiivseid või hiljuti aktiveerunud murranguid;
- mõjukad gaasilekked on haruldased ja nendel on tendents seostuda arvukate murrangutega vulkaanilistel ja geotermilistel aladel, kus looduslikud protsessid pidevalt tekitavad CO₂;
- gaasianomaaliad esinevad maapinnal tavaliselt lokaalsete laikudena, millel on pinnalähedasele keskkonnale piiratud ruumiline mõju.

Seetõttu on lekkeks vaja mitmete spetsiifiliste tingimuste kombinatsiooni. Järelikult on väga ebatõenäoline, et hästi valitud ja hoolikalt konstrueeritud geoloogilise ladustamise kohas hakkab CO₂ lekkima. Kuigi potentsiaalne leke on väike, peab täielikult mõistma sellega kaasnevaid protsesse ja võimalikke efekte, et valida, kujundada ja hallata võimalikult ohutuid CO₂ geoloogilise ladustamise kohti.

Joonis 1
CO₂ võimalikud väljumisteed puuraugust. Leke läbi muutunud materjali (c,d,e) või piki ühenduskohti (a,b,f).





Mõju inimestele

Me hingame CO₂ kogu aeg sisse. CO₂ on ohtlik inimeste tervisele vaid väga suure kontsentratsiooni puhul sisaldustega üle 50 000 ppm (5%), põhjustades peavalu, peapööritust ja iiveldust. Sellest suuremad kontsentratsioonid võivad põhjustada surma, kui mõju on liiga pikaajaline, eriti lämbumise teel, kui hapnikusisaldus õhus on alla 16%. Kui CO₂ lekib avatud või tasandikulisel alal, siis läheb see õhus kiiresti laiali isegi madalate pilvede puhul. Potentsiaalne risk elanikkonnale piirdub seega lekkega suletud keskkonnas ja topograafilistes nõgudes, kus kontsentratsioon võib tõusta, sest CO₂ on tihedam kui õhk ja kipub kogunema maapinna lähedale. Vabaneva gaasiga alade tunnuste teadmine on kasulik riski vältimisel ja käitlemisel. Tegelikult elavad paljud inimesed aladel, kus on igapäevaseid gaasi väljavoole. Näiteks asuvad Itaalias Giampinos Rooma lähedal majad vaid 30 m kaugusel gaasiavadest, kus CO₂ kontsentratsioon mullas ulatub 90%-ni ja umbes 7 tonni CO₂ vabaneb iga päev ning tungib õhku. Kohalikud elanikud kasutavad ohu vältimiseks lihtsaid meetmeid, näiteks vältides magamist keldrites ja ventileerides hästi maju.

Mõju keskkonnale

Potentsiaalne mõju ökosüsteemidele on muutlik sõltuvalt sellest, kas ladustamiskoht asub maismaal või mere põhjas.

Mere ökosüsteemides on CO₂ lekke efektiivselt lokaalne pH vähenemine ja sellega kaasnev mõju eeskätt loomadele, kes elavad merepõhjas ja ei saa ära minna. Siiski, tagajärjed on ruumiliselt limiteeritud ja pärast lekke raugemist näitab ökosüsteem peagi taastumise märke.

Maapealsetes ökosüsteemides on mõju kokkuvõtlikult järgmine:

- **taimestik** – kuigi mullagaasi CO₂ kontsentratsioon kuni 20–30% võib soodustada

taime viljastumist ja suurendada teatud liikide kasvukiirust, võivad suuremad CO₂ sisaldused olla letaalsed mõnede, kuid mitte kõigi taimede jaoks. See efekt on siiski äärmiselt lokaalne gaasiava läheduses ja taimestik võib jääda tervislikuks isegi mõne meetri kaugusel sellest (**joonis 2**);

- **põhjavee kvaliteet** – põhjavee keemiline koostis muutub CO₂ lisandumisel, sest vesi läheb happelisemaks ja elemendid võivad vabaneda põhjaveekihi kivimitest ja mineraalidest. Isegi kui CO₂ lekib joogivee kihti, jääb efekt lokaliseerituks ja selle mõju ulatust uurivad teadlased korrapäraselt. Paljud põhjaveekihi Euroopas on rikastatud loodusliku CO₂-ga. Sellist vett pannakse pudelisse ja müüakse kui „kihisevat mineraalvett“;
- **kivimi terviklikkus** – põhjavee happelisuse suurenemine võib põhjustada kivimi lahustumist, struktuurse terviklikkuse vähenemist ja langatuslohkude teket. Seda tüüpi mõju esineb siiski vaid väga spetsiifiliste geoloogiliste ja hüdrogeoloogiliste tingimuste puhul (tektooniliselt aktiivsed suure voolukiirusega põhjaveekihi, karbonaatide-rikkad mineraalid), mis ei ole tõenäolised inimeste rajatud geoloogilise ladustamise kohtades.

Kokkuvõtteks tuleb öelda, et kuna CO₂ iga hüpoteetilise lekke mõju sõltub spetsiifilisest asukohast, siis igakülgne teave geoloogilisest ja struktuurset taustast võimaldab meil identifitseerida võimalikke gaasi liikumise teid, valida vähima lekkepotentsiaaliga ladustamiskohti, ennustada gaasi käitumist ning nii hinnata ja ära hoida olulist mõju inimestele ja ökosüsteemile.

Joonis 2
CO₂ lekke mõju taimestikule suure (vasakul) ja vähenenud (paremal) voolu puhul. Mõju piirneb alaga, kus CO₂ lekib.

Kuidas me saame seirata ladustamiskohta maa all ja pinnalt?

Kõik CO₂ ladustamispaigad vajavad seiramist töövõimelisuse ning ohutuse seisukohalt, keskkonnakaitselistel, sotsiaalsetel ja majanduslikel põhjustel. Tuleb luua strateegia otsustamiseks, mida ja kuidas seirata.

Milleks me vajame seiret?

Ladustamiskoha suutlikkuse seire on äärmiselt vajalik, veendumaks, et CO₂ geoloogilise ladustamise põhiülesanne (antropogeense CO₂ pikaajaline isoleerimine atmosfäärist) on saavutatud. Põhjused ladustamiskohtade seireks on arvukad:

- **Operatsioonilised:** sisestamisprotsessi kontroll ja optimeerimine.
- **Ohutus- ja keskkonnavalased:** minimeerida või ära hoida igasugune mõju inimestele, elusloodusele ja ökosüsteemidele ladustamiskoha läheduses, kindlustada globaalse kliimamuutuse leevendumine.
- **Sotsiaalsed:** varustada üldsust teabega, mis on vajalik konkreetse ladustamiskoha ohutuse mõistmiseks ja üldsuse usalduse saavutamiseks.
- **Rahanduslikud:** CCS tehnoloogia turukindluse loomiseks ja CO₂ ladustatud mahtude kontrollimiseks, et neid tunnustataks kui „välditud emissioone“ Euroopa Liidu heitmekaubanduse skeemi (European Union's Emission Trading System: ETS) tulevastes faasides.

Nii keskkonna esialgse seisundi (nn baasjoon) kui ka järgnev ladustamiskoha tegevuse näitajate seire on tähtis regulatiivne nõue Euroopa Komisjoni 23. aprillil 2009 avaldatud CCS direktiivis. Operaatorid peavad olema võimelised näitama, et ladustamise talitus vastab eeskirjadele ja jätkub sellisena kaua. Seire on tähtis komponent, mis vähendab ebamäärasusi ladustamiskoha tegevuses ja seega peab see olema ohutustegevuse korraldamiseks tugevasti seotud.

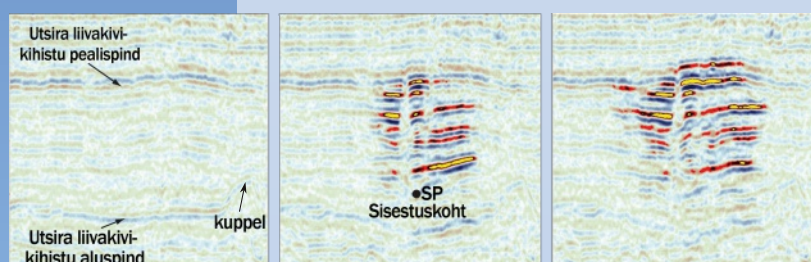
Millised on seireobjektid?

Seire võib olla keskendatud erinevatele objektidele ja protsessidele ladustamiskoha erinevates osades, näiteks:

- Voo kujutis – CO₂ jälgimine, kui see liigub si-sestuspunktist eemale. See annab juhtandmeid CO₂ edasist levikut ladustamiskohas prognoosivate mudelite kalibreerimiseks. Paljud tehnoloogiad on juba praegu selleks kasutusvalmid. Näiteks korduvad seismilised mõõdistamised, mida on edukalt kasutatud mitmetes katse- ja pilootprojektides (**joonis 1**).
- Katendi terviklikkus - on vaja hinnata, kas CO₂ on ladustamise reservuaaris isoleeritud ja võimaldada varakult hoiatada CO₂ ootamatust ülespoole liikumisest. See võib olla eriti tähtis projekti sisestamisfaasi ajal, kui rõhk reservuaaris on ajutiselt suurenenud.
- Puuraugu terviklikkus. See on tõsine probleem, kuna sügavad puuraugud võivad saada otseteeks CO₂ liikumisel maapinnale. CO₂ sisestus-, vaatlus- või mahajäetud puurkaeve peab hoolikalt seirama sisestamisfaasi ajal ja ka hiljem, et vältida CO₂ äkilist väljavoolu. Seiret kasutatakse ka kontrollimaks, kas puuraugud, kui neid enam ei vajata, on tõhusalt suletud. Olemasolevaid geofüüsikalisi ja geokeemilisi seiresüsteeme, mis on tavapraktika nafta- ja gaasitööstuses, saab paigaldada puuraukude kohale varajase hoiatamise võimaldamiseks ja ohutuse kindlustamiseks.
- Liikumine katendi peal. Ladustamiskohtades, kus madalamal asuvatel kivimitel on katendikivimitega sarnased omadused, võivad katendil lasuvad kivimid osutada võtmeks CO₂ merre või atmosfääri lekkimise riski vähendamisel. Kui reservuaari või katendi ümbruse seire näitab ootamatut leket läbi katendi, on katendil lasuvate kivimite seire vajalik. Paljud voo kujutise või katendi seire tehnoloogiad on kasutatavad ka katendil lasuvate kivimite seireks.
- Pindmise lekke avastamine ja mõõtmine. Veendumaks, et sisestatud CO₂ ei ole pinnale liikunud, on võimalik kasutada geokeemilisi, biokeemilisi ja kaugseire tehnoloogiaid lekke lokaliseerimiseks, CO₂ mullas levimise ning atmosfääris või merekeskkonnas hajumise hindamiseks ja seireks (**joonis 2**).
- Ladustatud CO₂ kogus korralduslikust ja rahanduslikust seisukohast lähtudes. Kuigi sisestatud CO₂ kogust saab mõõta puuraugu suudme juures, on reservuaaris sisalduva hulga määramine tõeline katsumus. Kui CO₂ lekib maapinna lähedale, on arvepidamiseks vaja määrata vabanenud gaasi kogust seoses kasvuhoonegaaside inventuuri ja tulevaste heitmekaubanduse skeemidega.

Joonis 1
Seismiline
läbilõige CO₂ voo*
seireks Sleipneri
piloottprojektis
enne CO₂ sisesta-
mist (mis algas
1996. aastal) ja
pärast sisestamist
(3 ja 5 aastat
hiljem).

Enne sisestamist (1994) 2,35 Mt CO₂ (1999) 4,36 Mt CO₂ (2001)



• Maapinna liikumised ja mikroseismilisus*. CO₂ sisestamisest tingitud suurenenud rõhk reservuaaris võib teatud juhtudel oluliselt suurendada mikroseismilist ja maapinna väikese ulatusega liikumiste potentsiaali. Mikroseismilise seire tehnoloogiad ja kaugmeetodid (aero- või satelliitmõõdistamised) võimaldavad mõõta isegi väga väikeseid maapinna deformatsioone.

Kuidas seiratakse?

Suures valikus seiretehnoloogiaid on juba kasutatud tõestus- ja uuringuprojektides. Nende seas on meetodid, mis otseselt seiravad CO₂, ja sellised, mis kaudselt mõõdavad selle mõju kivimitele, fluidumile ja keskkonnale. Otsesed mõõtmised sisaldavad sügavate puuraukude fluidumi analüüsi või gaasi kontsentratsiooni mõõtmist mullas või atmosfääris. Kaudseteks meetoditeks on geofüüsikalised mõõdistamised ja puuraugus rõhu muutuste või pinnasevees pH muutuste mõõtmine.

Seiret on vaja nii merel kui ka maal asuvates ladustamispaikades. Vastava seiremeetodi valik sõltub asukoha tehnilistest ja geoloogilistest tingimustest ning seire eesmärkidest. On olemas juba suur hulk seiremeetodeid (**joonis 3**), millest paljud on end hästi tõestanud nafta- ja gaasitööstuses. Neid meetodeid on kohandatud CO₂ kontekstis. Tehakse ka uuringuid olemasolevate meetodite optimeerimiseks või innovatiivsete tehnoloogiate arendamiseks eesmärgiga parandada resolutsiooni ja töökindlust, alandada maksumust, automatiseerida opereerimist ja demonstreerida efektiivsust.

Seire strateegia

Seire strateegia kujundamisel tuleb teha palju otsuseid, mis sõltuvad igale ladustamiskohale spetsiifilistest geoloogilistest ja tehnilistest

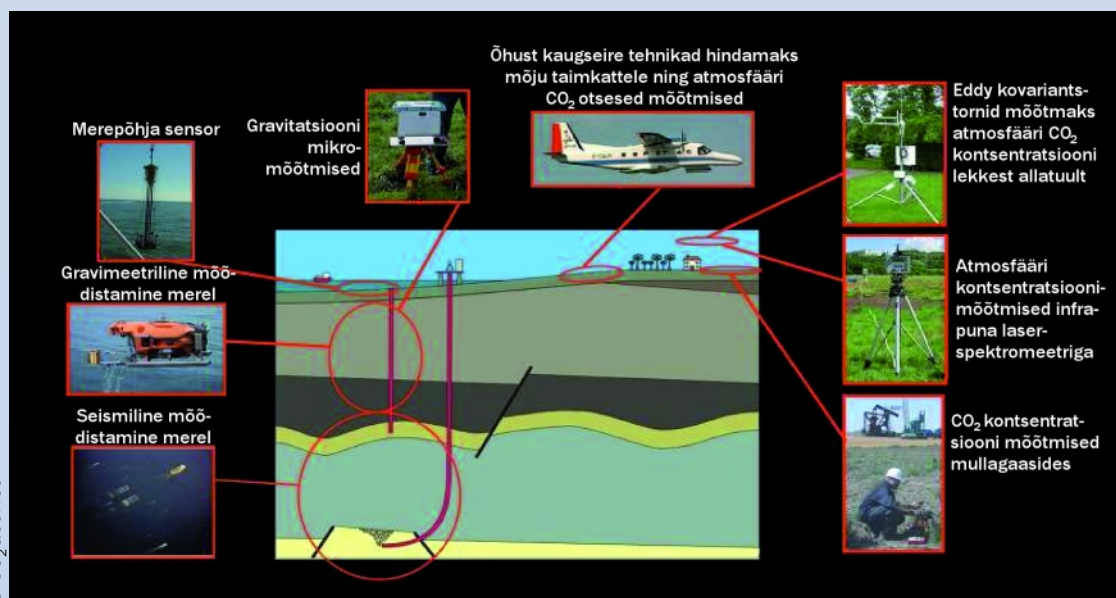
tingimustest, näiteks reservuaari kuju ja sügavus, CO₂ voo eeldatav levik, võimalikud lekketeed, lasuvate kivimite geoloogia, sisestamise aeg ja voolukiirus ning pindmised kriteeriumid, nagu topograafia, asustustihedus, taristu ja ökosüsteemid. Kui otsused kõige sobivamate mõõtmismeetodite ja mõõtekohtade suhtes on tehtud, tuleb enne CO₂ sisestamist läbi viia alusmõõdistamised, mis on võrdlusalusks tulevaste mõõtmiste puhul. Lõpuks, iga seireprogramm peab olema paindlik, et see suudaks areneda, kui ladustamisprojekt ise areneb. Seirestrateegia, mis on võimeline kõiki neid probleeme tervikuks ühendama, parandades samal ajal maksumuse efektiivsust, on kriitiline komponent riskianalüüsis ning ohutuse ja efektiivsuse kindlakstegemisel.

Kokkuvõttes me teame, et CO₂ ladustamiskoha seire on jõukohane paljude meetoditega, mis on juba turul saadaval või arendamise faasis. Pidevalt tehakse uuringuid mitte ainult uute vahendite arendamisel (eriti kasutamiseks merepõhjas), vaid ka seirevõime optimeerimiseks ja kulutuste vähendamiseks.



© CO₂GeoNet

Joonis 2
Päikesepatareidest toituv seirepoi, ujukid ja vahend gaasiproovide võtmiseks merepõhjust.



Joonis 3
Väike valik CO₂ ladustamissüsteemi erinevaid komponente seirata võimaldavate meetodite illustreerimiseks.

Milliseid ohutuskriteeriume on vaja kehtestada ja arvestada?

Selleks et kindlustada ladustamise ohutust ja efektiivsust, peavad reguleerivad ametkonnad kehtestama ja operaatorid arvestama objekti kujundamise ja opereerimise tingimusi.

Kuigi CO₂ geoloogiline ladustamine on nüüd laialdaselt tunnustatud kui üks usaldusväärsetest valikutest kliimamuutuse leevendamiseks, on vaja sätestada ohutuskriteeriumid inimestevahelise ja kohalikele keskkonnale enne tööstuslike protsesside laialdast alustamist. Selliseid kriteeriume saab defineerida kui nõudeid operaatoritele, mis on ametkondades kehtestatud, tagamaks, et mõju tervisele, ohutusele ja keskkonnale (kaasa arvatud põhjavee ressursid) on tühised lühikese, keskmise ja pika perioodi vältel.

CO₂ geoloogilise ladustamise üks võtmeküsimusi on see, et ladustamine peab olema kestev ja järelkult ladustamiskohad ei tohi lekkida. Siiski, "mis-siis-stsenaarium" tähendab, et riske tuleb hinnata ja operaatorid peavad arvestama mõõtmisnõuetega, mis aitaksid vältida lekkide või ladustamiskoha anomaalset käitumist. Vastavalt Valitsustevahelise Kliimamuutuste Paneeli nõuetele (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC), peab sisestatud CO₂ jääma maa alla vähemalt 1000 aastaks, mis võimaldab stabiliseerida selle sisaldust atmosfääris või kahandada seda loodusliku vahetuse teel ookeaniveega, seega minimeerides globaalsest soojenemisest tingitud maapinna temperatuuri tõusu. Lokaalset mõju tuleb hinnata ajaskaalas, mis ulatub päevadest tuhandete aastateni.

CO₂ ladustamise projekti jooksul saab eraldada mitmeid peamisi etappe (**joonis 1**). Ohutust aitavad tagada:

- hoolikas ladustamiskoha valik ja iseloomustus;
- ohutuse hinnang;
- korrektne opereerimine;
- vastav seireplaan;
- pädev korrektiivplaan.

Kaasnevad kriitilised eesmärgid on:

- kindlustada, et CO₂ jääb reservuaari;
- säilitada puuraugu terviklikkus;
- hoida reservuaari füüsikalisi omadusi (poorsus, läbilaskvus, sisestatavus) ja katendi läbitungimatust;

- võtta arvesse CO₂ voolu koostist, osutades erilist tähelepanu seal sisalduda võivatele võõrlisanditele, mida ei ole kinnipüüdmisel eemaldatud. See on tähtis puurauguga, reservuaariga, katendiga ja (lekke puhul) lasuva põhjaveega vastastikuse kahjuliku reaktsiooni ärahoimiseks.

Ohutuskriteeriumid projekti kavandamisel

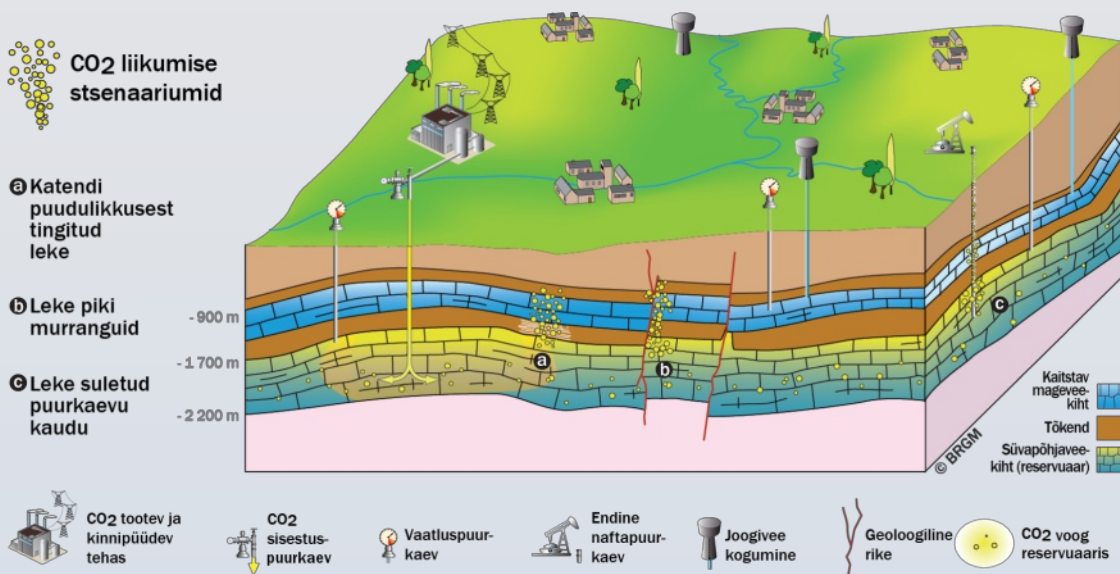
Ohutust peab selgitama juba enne ladustamise algust. Peamised komponendid, mida tuleb seoses ladustamiskoha valikuga uurida, on:

- reservuaar ja katend;
- katendil lasuvad kivimid, eriti läbitungimatud kihid, mis võivad toimida sekundaarse tihendina;
- läbilaskvate murrangute või puuraukude olemasolu, mis võivad olla teedeks maapinnale;
- joogivett sisaldavad põhjaveekihid;
- rahvastikust ja keskkonnast tingitud piirangud maapinnal.

Nafta- ja gaasileiukohtade uurimise meetodeid kasutatakse ladustamiskoha geoloogilise ehituse ja kuju hindamiseks. CO₂ keemiline, geomehaaniline ja fluidumi voo modelleerimine reservuaaris võimaldab prognoosida CO₂ käitumist ja selle pikaajalisi tagajärgi ning määratleda efektiivse sisestamise parameetreid. Selle tulemusena peab ladustamispaiga hoolikas iseloomustus andma „normaalse“, ladustamiskohale vastava ladustamistegevuse stsenaariumi, mille puhul me oleme kindlad, et CO₂ jääb reservuaari. Riskihinnanguks on vaja siis ladustamise tulevikuseisundite jaoks arvesse võtta vähem usaldust äratavaid stsenaariume, mis sisaldavad ootamatuid sündmusi. Eriti oluline on vaatluse alla võtta potentsiaalsed lekketeed, kaitsetud kohad ja efektid (**joonis 2**). Iga lekkestsenaariumi peavad analüüsima eksperdid ja, kus võimalik, tuleb lekke esinemise tõenäosuse ja tõsiduse hindamiseks kasutada numbrilist modelleerimist. Näiteks CO₂ voo leviku evolutsiooni tuleb hoolikalt kaardistada, selleks et leida ühendust murranguvööndiga. Riskihinnangul tuleb hoolikalt hinnata ka tundlikkust sisestamisparameetrite muutustele ja ebamäärasustele. CO₂ võimaliku mõju hindamine inimestele ja keskkonnale toimub mõju hindamisuuringute kaudu, mis on tavaline praktika tööstuslike seadmete litsentseerimi-

Joonis 1
Ladustamisprojekti etapid.





Joonis 2
Võimaliku lekke
stsenaariumi
näide.

sel. Seejuures vaadatakse läbi nii normaalsed kui ka lekkestsenaariumid seadmega seotud iga võimaliku riski hindamiseks.

Nii pika- kui ka lühiajaline seireprogramm tuleb koostada vastavalt riskianalüüsi tulemustele ja kontrollida erinevates stsenaariumides määratletud kriitilisi parameetreid. Projekti peamisteks eesmärkideks on CO₂ voo liikumise jälgimine, puuraugu ja katendi terviklikkuse kontrollimine, iga võimaliku CO₂ lekke avastamine, pinnasevee kvaliteedi hindamine ja veendumine, et CO₂ ei ole maapinnani ulatunud. Korrigeerimise ja leevendamise plaan on ohutuse hinnangu viimane komponent ja selle sihiks on lekke või anomaalse käitumise korral kasutatava korrektiivsete meetmete nimekirja detailiseerimine. See hõlmab katendi terviklikkust ja puuraugu vigastusi sisestamise ajal ja järgneval perioodil ning võtab arvesse äärmuslikke paranduslikke lahendusi, näiteks ladustamise pööratavust. Olemasolev oskusteave hõlmab standardseid nafta- ja gaasitööstuse võtteid, nagu järeltootmise lõpetamine, sisestamisrõhu vähendamine, sisestatud gaasi osaline või täielik tagasitõmbamine, vee väljavõtmine rõhu leevendamiseks, ülakihtide gaasi eemaldamine jne.

Ohutuskriteeriumid opereerimise ajal ja pärast sulgemist

Peamine ohutusemure on seotud operatsiooni- faasiga: rõhu vähenemine pärast sisestamise lõppu muudab ladustamiskoha ohutumaks. Veendumus võimes sisestada ja ladustada CO₂ ohutul moel toetub tööstusettevõtete kogemustele. CO₂ on üsna tavaline produkt, mida kasutatakse mitmesugustes tööstusharudes, seega ei tõstata selle aine käitlemine uusi probleeme. Operatsioonide kavandamine ja kontroll põhineb peamiselt nafta- ja gaasitööstuse oskusteabel, eriti loodusliku gaasi perioodilisel ladustamisel ja nafta täiendaval tootmisel. Peamised parameetrid, mida on vaja kontrollida:

- sisestusrõhk ja voolukiirus – rõhk peab olema

nii väike, et katendis ei tekiks lõhesid;

- sisestatud kogus, et rahuldada modelleerimisega määratletud prognoose;
- sisestatud CO₂ voolu koostis;
- sisestuspuuraukude ja CO₂ voos või selle läheduses asuvate puuraukude terviklikkus;
- CO₂ voo levimine ja iga lekke avastamine;
- maapinna stabiilsus.

Sisestatud CO₂ tegelikku käitumist sisestamise vältel tuleb prognoosidega korduvalt võrrelda. See täiustab pidevalt meie teadmisi ladustamiskohast. Kui on avastatud anomaalne käitumine, tuleb seireprogrammi uuendada ja vajaduse korral alustada korrektiivtegevust. Lekkekahtluse puhul tuleb keskenduda vajalikud seirevahendid ladustamiskoha spetsiifilisele alale reservuaarist kuni maapinnani. See võimaldab avastada CO₂ kerkimist ja igasugust kahjulikku mõju joogivett sisaldavatele põhjaveekihtidele, keskkonnale ja inimestele.

Kui sisestamine on lõpetatud, algab sulgemisfaas: puuraugud tuleb korralikult sulgeda ja maha jätta, modelleerimise ja seire programmid uuendada ja kui vaja, teha riski vähendamiseks korrektiivmõttmised. Kui riskitaset peetakse küllalt madalaks, antakse vastutus ladustamise eest üle riigivõimule ja seiretegevus lõpetatakse või minimeeritakse.

Euroopa direktiiv loob legaalse raamistiku, veendumaks, et CO₂ kinnipüüdmine ja ladustamine on jõukohane leevendusvaliku võimalus ning seda saab teha ohutult ja vastustundlikult.

Kokkuvõttes võib öelda, et ohutuskriteeriumid on hädavajalikud CO₂ ladustamise edukaks tööstuslikuks rakendamiseks. Neid tuleb kohaldada iga spetsiifilise ladustamispaiga tarvis. Need kriteeriumid on eriti tähtsad üldsuse heakskiidu saavutamiseks ja olulised litsentseerimisel, kui reguleerivad organisatsioonid peavad otsustama, milline peab olema ohutuse nõuete detailsusaste.

Seletav sõnastik

CCS (CO₂ Capture and Storage): CO₂ kinnipüüdmine ja ladustamine.

CO₂ voog: superkriitilise CO₂ ruumiline levik kivimites.

CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum). Süsihappegaasi eraldamise juhtfoorum: rahvusvaheline kliimamuutuste initsiatiiv, mis on keskendunud täiustatud ja tulusate tehnoloogiate arendamisele süsihappegaasi eraldamiseks, kinnipüüdmiseks, transportimiseks ja pikaajaliseks ladustamiseks.

EU Geocapacity (EL geomahutavus): lõpule viidud Euroopa uuringuprojekt, mis hindas inimtegevuse tulemusena väljapaisatud CO₂ geoloogilise ladustamise võimalikku mahtu Euroopas.

GESTCO: Euroopa lõpule viidud uuringuprojekt, mis hindas CO₂ geoloogilise ladustamise võimalusi 8 riigis: Norra, Taani, Inglismaa, Belgia, Holland, Saksamaa, Prantsusmaa ja Kreeka.

IEAGHG (International Energy Agency – Greenhouse Gas R&D programme). Rahvusvahelise Energiaagentuuri kasvuhoonegaaside vähendamise programm: rahvusvaheline koostöö, mille eesmärgiks oli vähendada kasvuhoonegaaside emissiooni, levitada uuringute tulemusi ning määratleda uurimise, arenduse ja demonstreerimise objektid, ning edendada vastavat tööd.

IPCC (International Panel on Climate Change). Valitsustevaheline Kliimamuutuste Paneel: selle asutuse rajasid 1988. aastal WMO (World Meteorological Organisation: Ülemaailmne Meteoro-loogiaselts) ja UNEP (United Nations Environment Programme: Ühinenud Rahvaste Organisatsiooni keskkonnaprogramm) selleks, et hinnata teaduslikku, tehnilist ja sotsiaalmajanduslikku informatsiooni, mis on oluline kliimamuutuste, selle potentsiaalse mõju ning kohanemise ja leevendamise võimaluste mõistmiseks. IPCC ja Al Gore said 2007. aastal Nobeli rahupreemia.

Katend: läbitungimatu kivimkeha, mis toimib barjäärina vedelike ja gaaside liikumisel ning moodustab reservuaari katmise kaudu püünise.

Katendi lasum: geoloogilised kihid, mis asuvad reservuaari katendi ja maapinna (või merepõhja) vahel.

Litostaatiline surve: lasuvate kivimite surve lamavatele kivimitele. Litostaatiline surve suureneb sügavuse suurenedes.

Lisateave:

IPCC eriaruanne CCS teemal:

http://www.ipcc.ch/publications_and_data/reports_carbon_dioxide.htm

Euroopa Komisjoni CCS veebileht:

http://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ccs/index_en.htm

IEAGHG seirevahendite veebileht:

http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html

Looduslik analoog: looduslik CO₂ reservuaar. Neid on nii lekkivaid kui ka mittelekkeivaid. Nende uurimine võib täiustada meie arusaama CO₂ pikaajalisest saatusest geoloogilistes süvasüsteemides.

Läbilaskvus: poorsete kivimite omadus või võime läbi lasta fluidumit. See on rõhugradiendi mõjul fluidumi voolamise suhtelise kerguse mõõt.

Mikroseismilisus: väga väikesed maakoorevärinad, mis võivad olla tingitud mitmesugustest looduslikest ja kunstlikest mõjuritest.

Nafta täiendav tootmine (EOR): meetod, mis tõstab nafta tootmise taset fluidide (nagu CO₂ aur) sisetamise teel, aidates naftat reservuaaris mobiliseerida.

pH: lahuse happelisuse (<7) või aluselise (>7) määr, pH=7 vastab neutraalsele lahusele.

Poorsus: mineraalidevaheliste tühimike koguhulk protsentides kivimi mahust. Neid tühimikke kutsutakse poorideks ja need võivad olla fluidumiga täidetud. Sügaval asuvates kivimites on fluidumiks tavaliselt soolane vesi, kuid see võib olla ka nafta või gaas (näiteks metaan või loodusliku tekkega CO₂).

Puurauk: ringikujuline puuritud auk, eriti väikese läbimõõduga sügav auk, näiteks naftapuuraug.

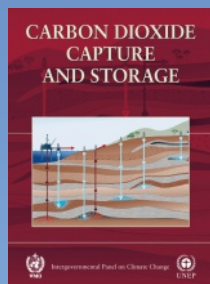
Põhjaveekiht: läbilaskev kivimkeha, mis sisaldab vett. Kõige pinnalähedasemad põhjaveekihiid sisaldavad magevett, mida inimesed tarbivad. Sügavamad põhjaveekihiid on täidetud joogiks kõlbmatu soolase veega. Neid kutsutakse soolasteks põhjaveekihtideks.

Reservuaar: kivimkeha või sete, mis on küllalt poorne või läbilaskev CO₂ ladustamiseks. Kõige tavalisemad reservuaarikivimid on liivakivi või lubjakivi.

Sisestatavus: iseloomustab fluidumi (nagu CO₂) kivimitesse sisestamise hõlpsust. Seda väljendab suhtarv, mis saadakse sisestamise määra jagamisel rõhkude vahel sisestamispunkti (puuraugu põhjas) ja ümbritsevates kivimites.

Soolvesi: väga soolane vesi, s.o vesi, milles lahustunud soola kontsentratsioon on suur.

Superkriitiline: fluidumi seisund kriitilisest temperatuurist ja rõhust (31,03 °C ja 7,38 MPa CO₂ korral) suuremate väärtuste puhul. Selliste fluidumite omadused muutuvad ühtlaselt gaasitaolisest madala rõhu juures vedeliktaoliseks kõrge rõhu puhul.



Mis on CO₂GeoNet?



CO₂GeoNet on Euroopa teaduslik ühendus, kelle poole te võite pöörduda selge ja igakülgse informatsiooni saamiseks CO₂ geoloogilisest ladustamisest ning uuenduslikust ja vitaalsest kliimamuutuste leevendamise tehnoloogiast. CO₂GeoNet loodi Euroopa Komisjoni poolt kui tippvõrk (Network of Excellence) 6. raamprogrammi raames (6th Framework Programme: EC FP6 leping 2004-2006). See ühendab 13 asutust 7 Euroopa riigist, kõik kõrge rahvusvahelise profiiliga ja kriitilise massiga CO₂ geoloogilise ladustamise uurimise suhtes. 2008. aastal registreeriti CO₂GeoNet mittetulundusliku ühinguna Prantsuse seaduse alusel, selleks et jätkata tegevust pärast Euroopa Komisjoni finantstoetuse lõppemist.

CO₂GeoNet on suure kogemusega projektides, mis uurivad reservuaare, katendit, võimalikke lekke teid maapinnale, seirevahendeid, võimalikku mõju inimestele ja ökosüsteemidele, üldsuse poolt vastuvõttu ja teabeedastust. CO₂GeoNet pakub teenuseid mitmekesises valikus neljas peamises valdkonnas: 1) ühisuuringud; 2) koolitus ja võimekuse arendamine; 3) teadusnõu; 4) info ja kommunikatsioon.

CO₂GeoNet on progressiivselt kogunud jõudu ning muutunud püsivaks teadusteabe allikaks ja autoriteediks Euroopas, olles võimeline osutama vajalikku teadustuge CO₂ geoloogilise ladustamise laiaulatuslikuks ja ohutuks kasutamiseks.

Ühenduse laiendamine paneuroopalikuks toimub projekti CGS Europe kaudu. Seda koordineerivategevust finantseerib projekt EC FP7 (2010-2013). CGS Europe liidab kokku CO₂GeoNet ühenduse soliidse tuumiku ja 21 muud uurimisasutust, haarates nii 28 Euroopa riiki (24 liikmesriiki ja 4 liitunud riiki). Selle tulemusena on võimalik kaasata mitusada teadlast, kes on võimelised tegelema kõigi CO₂ geoloogilise ladustamise aspektidega multidistsiplinaarse integratsiooni kaudu. Meie eesmärgiks on varustada huvirühmi ja üldsust sõltumatu ja soliidse teadusinfoga CO₂ geoloogilise ladustamise teemal.



CO₂GeoNet: Euroopa tippvõrgustik CO₂ geoloogilise ladustamise alal

BGR (Saksamaa); **BGS** (Inglismaa); **BRGM** (Prantsusmaa); **GEUS** (Taani); **HWU** (Inglismaa); **IFPEN** (Prantsusmaa); **IMPERIAL** (Inglismaa); **NIVA** (Norra); **OGS** (Itaalia); **IRIS** (Norra); **SPR Sintef** (Norra); **TNO** (Holland); **URS** (Itaalia)



CGS EUROPE: Paneuroopa koordineerivategevus CO₂ geoloogilise ladustamise alal

CO₂GeoNet (13 ülalnimetatud liiget); **CzGS** (Tšehhi Vabariik); **GBA** (Austria); **GEOECOMAR** (Rumeenia); **GEO-INZ** (Sloveenia); **G-IGME** (Kreeka); **GSI** (Iirimaa); **GTC** (Leedu); **GTK** (Soome); **LEGMC** (Läti); **ELGI** (Ungari); **LNEG** (Portugal); **METU-PAL** (Türgi); **PGI-NRI** (Poola); **RBINS-GSB** (Belgia); **SGU** (Rootsi); **SGUDS** (Slovakkia); **S-IGME** (Hispaania); **SU** (Bulgaaria); **TTÜGI** (Eesti); **UB** (Serbia); **UNIZG-RGNF** (Horvaatia)



CO₂GeoNet on saavutanud suure tunnustuse Euroopas ja rahvusvahelisel areenil

CO₂GeoNet on heaks kiidetud Süsihappegaasi Eraldamise Juhtfoorumi (the Carbon Sequestration Leadership Forum: CSLF) poolt



CO₂GeoNet teeb tihedat koostööd Rahvusvahelise Energiaagentuuri kasvuhoonegaaside vähendamise programmiga (IEAGHG)



Brošüüri taust

Et tõsta üldsuse teadlikkust CO₂ geoloogilisest ladustamisest, tõstatas CO₂GeoNet küsimuse "Mida CO₂ geoloogiline ladustamine tegelikult tähendab?". CO₂GeoNet teadlaste töörühm valmistas ette nüüdistasemel vastused kuuetele asjasse puutuvale küsimusele, mis põhinevad ülemaailmsel uuringutel ja kogemustel. Sihiks oli selge ja erapooletu teadusinfo edastamine laiale publikule ja dialoogi julgustamine olulistest küsimustes, mis puudutavad CO₂ geoloogilise ladustamise tehnilisi aspekte. Seda tööd, mis on kokku võetud käesolevas brošüüris, esitleti koolitus- ja diskussiooni-seminaril Pariisis 3. oktoobril 2007.

Brošüüri "Mida CO₂ geoloogiline ladustamine tegelikult tähendab?" saab maha laadida paljudes keeltes aadressil:

<http://www.co2geonet.com/brochure/>

CO₂GeoNet

Euroopa Tippvõrgustik CO₂ geoloogilise ladustamise alal



www.co2geonet.eu

Sekretariaat: info@co2geonet.com

BGS Natural Environment Research Council-British Geological Survey, **BGR** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, **BRGM** Bureau de Recherches Géologiques et Minières, **GEUS** Geological Survey of Denmark and Greenland, **HWU** Heriot-Watt University, **IFPen** IFP Energies nouvelles, **IMPERIAL** Imperial College of Science, Technology and Medicine, **NIVA** Norwegian Institute for Water Research, **OGS** Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, **IRIS** International Research Institute of Stavanger, **SPR SINTEF** Petroleumsforskning AS, **TNO** Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, **URS** Sapienza University of Rome Dip. Scienze della Terra.



Eesti keelde tõlgiti EL 7. RP projekti “CGS Euroopa – Paneuroopa koordineerimisprojekt CO₂ geoloogilise ladustamise alal” raames Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituudis.



ISBN 978-9949-23-246-8